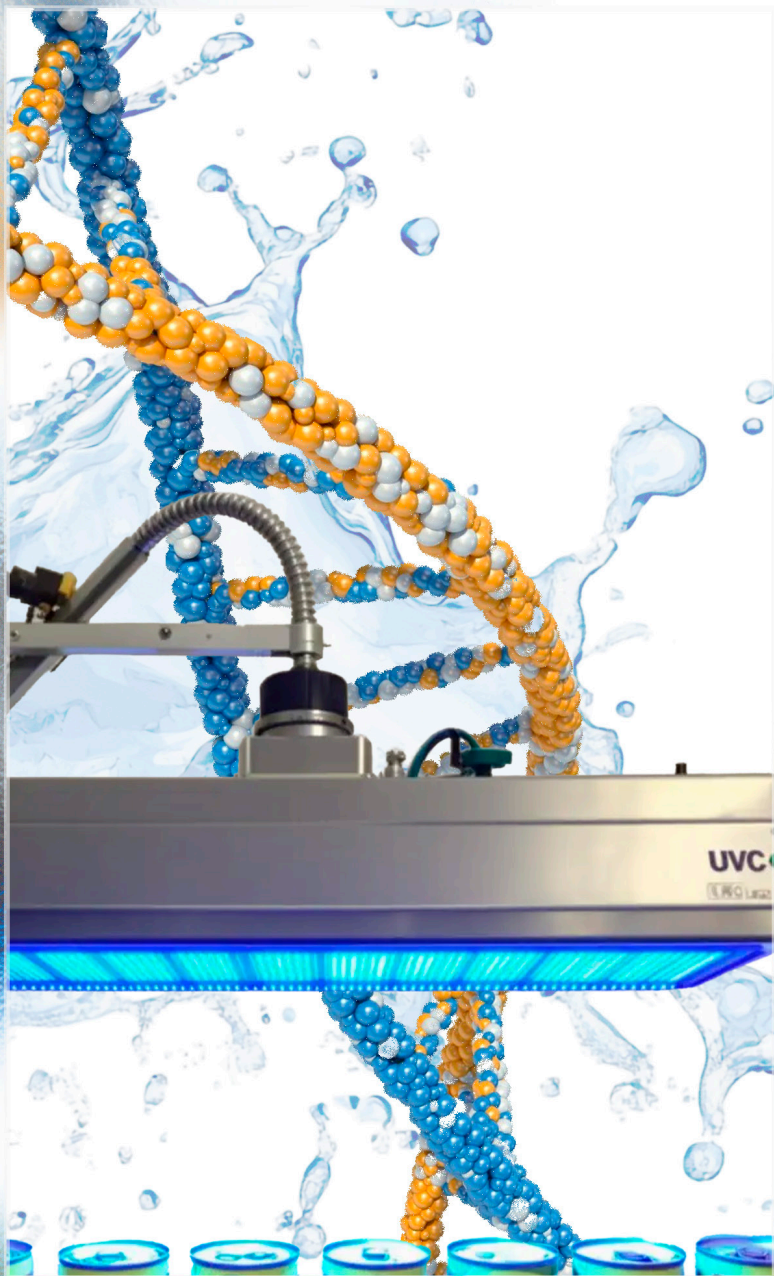


VOLUMEN (2021)

15

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 15 - 2021

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 15, volumen 15 (2021) 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[®]



CONTENIDOS

VOL. 15

- 07.** **Carta editorial**
Volumen 15
-
- 08.** **Producción de masas madre fermentadas con bacterias ácido lácticas y su aplicación en la industria de la panificación**
R. H. Hernández-Figueroa y A. López-Malo
-
- 24.** **Principios y aplicaciones de luz ultravioleta para el procesamiento de alimentos líquidos en operación continua: parámetros de diseño y operación**
C. Pihen-Martínez y N. Ramírez-Corona
-
- 48.** **Cladodios (*Opuntia spp.*): composición, compuestos bioactivos y sus beneficios en salud y nutrición**
R. Aparicio-Ortuño, M. T. Jiménez-Munguía, A. E. Ortega-Regules, T. S. Silva-Pereira y K. Villaseñor-López
-





VOOL
15

Carta editorial

VOL. 15

Ser investigador implica buscar soluciones a temas que generan inquietudes a lo largo de la carrera académica, partiendo de una pregunta de investigación. Existen diferentes métodos para abordar estas preguntas y uno de ellos es la revisión de literatura. Este es fundamental para comprender el estado actual del conocimiento, identificar los avances logrados y reconocer los vacíos que aún requieren ser aclarados. Sin embargo, llevar a cabo una revisión de literatura dentro de un proceso sistemático no es una tarea sencilla, pues existe un proceso pedagógico con normas y guías que conllevan la dedicación de numerosas horas de estudio para generar un material de calidad que integre lo producido en los últimos años.

En esta ocasión, los estudiantes del Doctorado en Ciencias de los Alimentos fueron invitados a reflexionar críticamente sobre una temática de interés, profundizando en ella, con la finalidad de responder a una pregunta de investigación. En el volumen 15, los estudiantes desarrollaron artículos de revisión bibliográfica sobre tópicos de vanguardia y relevancia en las áreas de ciencia e ingeniería de alimentos.

Estas contribuciones abordan tópicos variados, tales como la producción de masas madre y su aplicación en la industria de panificación, la implementación de tecnologías emergentes para procesamiento de alimentos y los compuestos bioactivos presentes en los cladodios (*Opuntia spp.*) y sus beneficios para la salud.

Esta actividad representó la primera experiencia formal en escritura académica de los estudiantes, lo cual constituyó un paso fundamental en su formación como investigadores con sólidas habilidades en redacción.

Dra. Taísa Sabrina Silva Pereira

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

Producción de masas madre fermentadas con bacterias ácido lácticas y su aplicación en la industria de la panificación

R. H. Hernández-Figueroa* y A. López-Malo

*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos

Correos electrónicos: ricardoh.hernandez@udlap.mx • aurelio.lopezm@udlap.mx



RESUMEN

El uso de masas madre para la elaboración de productos de panadería ha sido investigado en los últimos años como una alternativa para mejorar las características organolépticas del pan y su vida útil. Debido a ello, el propósito de esta revisión es presentar un panorama general de las investigaciones realizadas acerca del uso de masas madre y sus beneficios en la calidad del pan, así como presentar información relevante y reciente sobre el uso de masas madre y sus extractos acuosos para la conservación de los productos de panadería. En general, se ha demostrado que la incorporación de masas madre a la formulación del pan presenta un impacto positivo sobre el sabor y olor del producto, y ayuda a disminuir la velocidad del proceso de envejecimiento. A su vez, se ha observado que los compuestos bioactivos formados por las bacterias ácido lácticas (BAL) en las masas madre y en sus extractos presentan una capacidad antimicrobiana que ayuda de manera significativa al aumento de vida de anaquel del pan.

Palabras clave: masas madre, bacterias ácido lácticas, pan, antifúngico, vida útil.

ABSTRACT

The use of sourdoughs for the preparation of bakery products has been recently investigated as an alternative to improve the organoleptic characteristics of bread and its shelf life. Due to this, the purpose of this review is to present an overview of the research carried out on the use of sourdoughs and their benefits in bread quality, as well as to present relevant and recent information on the use of sourdoughs and its aqueous extracts for the preservation of bakery products. In general, it has been shown that the incorporation of sourdoughs into the bread formulation has a positive impact on the taste and smell of the product and helps to slow down its aging process. In turn, it has been observed that the bioactive compounds formed by lactic acid bacteria (LAB) sourdoughs and in their extracts have an antimicrobial capacity that significantly helps to increase the shelf life of bread.

Keywords: sourdough, lactic acid bacteria, bread, antifungal, shelf life.

INTRODUCCIÓN

El pan es uno de los alimentos fermentados que más se consume en el mundo y, en muchos casos, es la base alimentaria en un gran número de países. En general, es un producto que se elabora a partir del horneado de una masa previamente fermentada con levaduras y en algunos tipos de pan, en conjunto con otros microorganismos, los cuales le otorgan las características y atributos de calidad más importantes. Sin embargo, el pan fresco es un producto con una vida útil corta, regida principalmente por las alteraciones fisicoquímicas conocidas como envejecimiento y por el crecimiento de mohos en su superficie. Para mejorar la vida de anaquel de los productos de panadería, la industria de la panificación ha incorporado aditivos sintéticos y agentes antimicrobianos, los cuales han demostrado tener una capacidad para disminuir tanto el proceso de envejecimiento como el crecimiento de mohos. Sin embargo, la demanda de los consumidores por productos orgánicos o sin aditivos sintéticos ha devenido en la búsqueda de nuevas alternativas «naturales» que ayuden a reemplazar dichos aditivos y a mantener la vida útil de los panes (Cauvain y Young, 2003; Chavan y Chavan, 2011).

Una alternativa que ha sido investigada en los últimos años es el uso de masas madre en la formulación de productos de panadería. Por mucho tiempo, en la región de Europa se han empleado las masas madre para la elaboración del pan, ya que se ha observado que su incorporación ayuda a mantener las características organolépticas del producto y retrasa el crecimiento de mohos en su superficie. Se ha demostrado que durante la formación de las masas madre o masas agrias (*sourdough*) se forman compuestos como ácidos orgánicos, compuestos peptídicos y exopolisacáridos, los cuales ayudan a mantener la vida útil del producto, conservando las características de calidad del pan y disminuyendo la velocidad del crecimiento de mohos (Park *et al.*, 2006; Corsetti y Settanni, 2007; Chavan y Chavan, 2011; Garofalo *et al.*, 2012; Luz *et al.*, 2019). De igual forma, se ha demostrado la capacidad de los extractos acuosos de las masas madre fermentadas para inhibir el crecimiento de los principales mohos que deterioran el pan, generando de esta manera una alternativa prometedora como antimicrobiano natural en este tipo de productos (Ryan *et al.*, 2011; Samapundo *et al.*, 2017; Luz *et al.*, 2019). En este artículo se recopila la información genera-

da en los últimos años sobre el uso de masas madre fermentadas con bacterias ácido lácticas y de los extractos acuosos de las mismas, con el objetivo de mejorar la vida de anaquel de productos de panadería y observar los avances en torno a la identificación de los compuestos responsables de la actividad antifúngica.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. Principales modos de deterioro en el pan

El pan es un alimento muy perecedero debido primordialmente a su composición básica; la disminución de su calidad se debe, ante todo, a cambios fisicoquímicos y microbiológicos que empiezan a ocurrir una vez que pasa por el proceso de enfriamiento posterior al horneado. Durante dicho procedimiento, la pérdida de humedad y el medioambiente provocan cambios importantes en la textura, tanto de la miga como de la corteza. A medida que el tiempo de almacenamiento avanza, el fenómeno de retrogradación de almidón comienza, lo cual, sumado a la pérdida de humedad, incrementa la velocidad de aumento de firmeza. De igual forma, el deterioro microbiológico provocado por el crecimiento de mohos en la superficie del pan representa el problema de mayor importancia para la industria de la panadería, ya que genera pérdidas económicas muy altas para el sector (García *et al.*, 2019).

Los mohos proliferan fácilmente en el pan debido a que es un producto rico en carbohidratos (70-80 g carbohidratos/100 g pan), con valores de actividad de agua entre 0.94-0.97 y valores de pH alrededor de seis, las cuales son condiciones óptimas para el crecimiento de este tipo de microorganismos. Se ha demostrado que la contaminación de los productos de panadería con esporas de mohos, que se encuentran de manera natural en el entorno de la panadería, ocurre después del proceso de horneado: durante el enfriamiento, rebanado y empaquetado del producto, siendo estas últimas etapas las determinantes para definir la calidad microbiológica de estos productos (Magan *et al.*, 2003; García *et al.*, 2019).

Se ha identificado una variedad amplia de mohos en el deterioro del pan, siendo los géneros *Penicillium* y *Aspergillus* los más comunes e importantes, debido a la capacidad que presentan para crecer en un amplio rango de temperaturas y dis-

ponibilidad de agua, así como a su habilidad para producir una cantidad muy grande de esporas y que pueden encontrarse en el medioambiente. Las especies *Penicillium roqueforti*, *Penicillium paneum*, *Penicillium brevicompactum* y *Penicillium chrysogenum* han sido identificadas como las responsables del enmohecimiento del pan, caracterizado por la aparición de manchas de color verdiazul en la superficie del producto. Respecto al género *Aspergillus* se han aislado, en distintos tipos de pan, especies como *Aspergillus chevalieri*, *Aspergillus niger* y *Aspergillus pseudoglaucus*, las cuales provocan la aparición de manchas de diferentes colores, que van desde verdes hasta negras, y en algunos casos este tipo de mohos producen pigmentos amarillos que se difunden en la superficie del pan. Por otra parte, se han reconocido otras especies de mohos filamentosos implicados en el deterioro del pan; especies como *Rhizopus*, *Mucorales* y *Neurospora* han sido aisladas en un gran número de productos de panificación. Sin embargo, su aparición e implicación en el proceso de enmohecimiento del pan no es tan significativa como las mencionadas anteriormente (Magan *et al.*, 2003; Garcia *et al.*, 2019).

Con respecto al crecimiento de bacterias en los productos de panadería, se han encontrado algunas como la *Serratia marcescens* y *Endomyces fibuliger*, las cuales pueden generar manchas rojas o blancas en la superficie del pan. A su vez, se ha descrito el fenómeno denominado *hilado* o *pan filamentosos*, causado por el crecimiento de determinadas cepas de *Bacillus subtilis*, el cual genera cambios de color (amarillo) y una viscosidad pegajosa indeseable en el producto. Sin embargo, la frecuencia con la que aparece un crecimiento bacteriano en los panes es muy baja, en comparación con el crecimiento de mohos, por lo que la industria panadera se centra en eliminar las contaminaciones causadas por estos últimos microorganismos (Magan *et al.*, 2003; Jay, 2005).

Como se mencionó anteriormente, las pérdidas económicas ocasionadas por el proceso de enmohecimiento del pan son muy grandes, lo cual ha generado un impulso para desarrollar distintos métodos de conservación por parte de la industria de la panificación. Hoy en día, la forma más común para prevenir o controlar el crecimiento de mohos en el pan es la utilización de conservadores sintéticos, denominados antifúngicos. Los ácidos propiónico, sórbico y acético, y sus sales, son los conservadores mayormente seleccionados para combatir dicho crecimiento (Magan *et al.*, 2003). No obstante, las exigencias de los consumido-

res por productos libres de aditivos sintéticos o más «naturales», han llevado a desarrollar investigaciones sobre nuevos compuestos naturales que ayuden a preservar la vida de anaquel de los productos de panificación (Saranraj y Sivasakthivelan, 2015).

Una alternativa para el desarrollo de sustancias antifúngicas que ayuden a preservar la vida de anaquel del pan es la utilización de masas madre o sus extractos acuosos en la formulación. Numerosos estudios han descrito y caracterizado distintos compuestos antifúngicos producidos por ciertas bacterias ácido lácticas; cepas de *Lactobacillus plantarum*, *Lb. reuteri*, *Lb. sanfransiscensis*, *Lb. amylovorus*, entre otras, han demostrado la capacidad de producir sustancias bioactivas, en especial ácidos orgánicos y compuestos peptídicos, durante el proceso de fermentación para la obtención de las masas madre en la industria de la panificación, lo cual genera una alternativa para reemplazar los antifúngicos sintéticos (Rizzello *et al.*, 2011; Saranraj y Sivasakthivelan, 2015; Luz *et al.*, 2017, 2019; Su *et al.*, 2019).

2. Masas madre

Las masas madre o masas agrias (*sourdough*) son el resultado de fermentaciones espontáneas que se obtienen cuando harinas de diferentes granos (sobre todo trigo o cebada) se mezclan con una cantidad de agua adecuada, y se mantienen en condiciones de temperatura y tiempo favorables para el crecimiento de microorganismos propios de la harina o inoculados intencionalmente. Este tipo de productos fermentados son de los más antiguos conocidos por el hombre, y en muchos países siguen siendo utilizados en la elaboración de panes, como parte de su formulación, debido a las características únicas de textura y sabor que otorgan al producto final (Gänzle y Ripari, 2016). De igual forma, en años recientes el uso de masas madre en la industria de la panificación está aumentando de manera importante, debido al descubrimiento de las mejoras nutricionales, como el aumento de la biodisponibilidad de minerales y la generación de compuestos peptídicos con actividad antioxidante, y los efectos sobre la vida de anaquel que otorga la adición de estas masas a la formulación del pan (Chavan y Chavan, 2011; Zou *et al.*, 2016).

Los análisis e investigaciones microbiológicas que se han llevado a cabo sobre las masas madre han demostrado que dentro de este ecosistema conviven principalmente dos tipos de

microorganismos: bacterias ácido lácticas y levaduras. En la mayoría de los análisis las BAL comúnmente aisladas en las masas madre son del género *Lactobacillus*. Con respecto a las levaduras, sobre todo se han aislado e identificado levaduras de los géneros *Saccharomyces* y *Candida*. La biodiversidad de las BAL y las levaduras en las masas madre dependen, más que nada, del tipo de masa madre y el proceso de elaboración (De Vuyst y Neysens, 2005; Sakandar *et al.*, 2019).

2.1. Clasificación de las masas madre

De acuerdo con el proceso de preparación y la actividad metabólica de las principales BAL y levaduras que se encuentran en las masas madre, estas se pueden clasificar en tres tipos. La masa madre tipo I es una mezcla de harina y agua sometida a un proceso de incubación a temperaturas menores de 30 °C, inoculada con una masa madre previamente fermentada, con el fin de mantener alta la actividad metabólica de los microorganismos. En la masa madre tipo II, la mezcla de harina y agua es incubada a temperaturas por arriba de los 30 °C durante tiempos muy prolongados de fermentación (hasta cinco días); esta puede ser líquida y es muy utilizada como agente acidificante y generador de aromas en los productos de panadería. Finalmente, la

masa madre tipo III pasa por un proceso de secado, generalmente por aspersión; los microorganismos en estado activo se transforman primero a un estado latente por el secado y luego requieren ser reactivados y resuspendidos con agua antes de su uso como ingrediente del pan. Para productos de panificación a gran escala, la masa madre tipo III es la más utilizada como iniciador de premezclas, por su fácil manejo y larga vida de anaquel; sin embargo, es importante mencionar que el número de microorganismos viables de esta masa depende de las condiciones de secado (De Vuyst y Neysens, 2005; Lai y Lin, 2007; Sakandar *et al.*, 2019).

2.2. Bacterias ácido lácticas en las masas madre

La microbiota de las masas madre por lo general comprende dos tipos de microorganismos: bacterias ácido lácticas y levaduras; en la tabla I se muestran las distintas BAL y levaduras que han sido aisladas en los diferentes tipos de masas madre. Las poblaciones de estos dos tipos de microorganismos pueden estar en niveles de 10^6 - 10^9 UFC/g, y como tal, la proporción de las BAL con respecto a las levaduras es de aproximadamente 100:1; esto indica que la mayor contribución de formación de compuestos durante la fermentación de las masas madre está proporcionada por las BAL (Lai y Lin, 2007; Chavan y Chavan, 2011).

Tabla I. Principales bacterias ácido lácticas (BAL) y levaduras aisladas en los diferentes tipos de masas madre

Tipo de masa madre	Microorganismo			
	BAL heterofermentativa obligada	BAL heterofermentativa facultativa	BAL homofermentativa obligada	Levaduras
Tipo I	<i>Lactobacillus sanfranciscencis</i>	<i>Lactobacillus alimentarius</i>	<i>Lactobacillus acidophilus</i>	<i>Candida humilis</i>
	<i>Lactobacillus brevis</i>	<i>Lactobacillus casei</i>	<i>Lactobacillus delbrueckii</i>	<i>Candida milleri</i>
	<i>Lactobacillus reuteri</i>	<i>Lactobacillus plantarum</i>	<i>Lactobacillus amylovorus</i>	<i>Issatchenkia orientalis</i>
	<i>Lactobacillus fermentum</i>	<i>Lactobacillus paralimentarius</i>	<i>Lactobacillus farciminis</i>	<i>Candida Krusei</i>
	<i>Lactobacillus fructivorans</i>	-	<i>Lactobacillus mindensis</i>	-
	<i>Lactobacillus pontis</i>	-	-	-

Tabla I. Principales bacterias ácido lácticas (BAL) y levaduras aisladas en los diferentes tipos de masas madre (continuación)

Tipo de masa madre	Microorganismo			
	BAL heterofermentativa obligada	BAL heterofermentativa facultativa	BAL homofermentativa obligada	Levaduras
Tipo II	<i>Lactobacillus brevis</i>	-	<i>Lactobacillus acidophilus</i>	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> (añadida)
	<i>Lactobacillus frumenti</i>	-	<i>Lactobacillus delbrueckii</i>	
	<i>Lactobacillus pontis</i>	-	<i>Lactobacillus amylovorus</i>	-
	<i>Lactobacillus panis</i>	-	<i>Lactobacillus farciminis</i>	-
	<i>Lactobacillus reuteri</i>	-	<i>Lactobacillus johnsonii</i>	-
	<i>Lactobacillus sanfranciscensis</i>	-	-	-
	<i>Weissella confusa</i>	-	-	-
Tipo III	<i>Lactobacillus brevis</i>	<i>Lactobacillus plantarum</i>	-	-
	-	<i>Pediococcus pentosaceus</i>	-	-

Adaptada de De Vuyst y Neysens (2005), y Chavan y Chavan (2011).

Por otra parte, se han identificado en las masas madre BAL de los géneros *Enterococcus*, *Weissella*, *Lactococcus*, *Leuconostoc*, *Pediococcus* y *Lactobacillus*, siendo este último el de mayor importancia, ya que se han aislado más de 60 especies del mismo. A pesar de la gran diversidad de BAL que han sido reconocidas, solo algunas especies de lactobacilos sobreviven al proceso de mantenimiento y ciclos de alimentación a los que son sometidos las masas madre. En general, las BAL heterofermentativas obligadas sobreviven a estos procesos debido a su capacidad para metabolizar carbohidratos, la asimilación de una variedad amplia de aminoácidos y por su resistencia al ambiente ácido, provocada por los ácidos generados por las mismas bacterias. Las especies *Lb. plantarum* y *Lb. sanfranciscensis* han sido identificadas como las BAL con mayor presencia y resistencia en las masas madre. Se ha reportado que alrededor del 50 % de las masas madre fermentadas presentan un crecimiento de este tipo de BAL durante los distintos ciclos de alimentación (Gänzle y Ripari, 2016).

A su vez, los ciclos de alimentación de las masas madre, los cuales consisten en la adición de nueva harina y agua a la masa una vez cumplido su tiempo de fermentación, han demostrado

que afectan de manera significativa la diversidad de la microbiota en este tipo de elementos. Investigaciones han demostrado que, a medida que aumentan los ciclos de alimentación, la diversidad de la microbiota en las masas madre disminuye de manera significativa, siendo las especies *Lb. plantarum* y *Lb. sanfranciscensis* las predominantes a partir del décimo día de alimentación, pues son las que presentaron mayor capacidad de adaptación y resistencia a este proceso (Minervini *et al.*, 2012; Lin y Gänzle, 2014; Gänzle y Ripari, 2016; Manini *et al.*, 2016). Por otra parte, se han aislado especies como *Lb. brevis*, *Lb. paralimentarius*, *Lb. fermentum* y *Lb. casei*; pero han demostrado tener una baja capacidad para adaptarse al medio después de varios ciclos de alimentación de la masa madre (De Vuyst y Neysens, 2005; Gänzle y Ripari, 2016; Manini *et al.*, 2016).

2.3. Rutas metabólicas de las bacterias ácido lácticas durante la fermentación de masas madre

Las rutas metabólicas o los procesos que ocurren durante la fermentación ácido láctica dependen directamente del tipo de BAL presentes en la masa madre. A partir de la glucosa, las BAL homo-

fermentativas producen en su mayor parte ácido láctico/lactato (>90 %) a través de la glucólisis (fermentación homoláctica); mientras que las BAL heterofermentativas, además de producir este ácido (alrededor de 50 %), generan CO_2 , ácido acético u otros ácidos, y etanol a través de la vía 6-fosfogluconato/fosfocetolasa (6-PG/PC). Las hexosas distintas a las glucosas ingresan a las vías glucolíticas principales a nivel de glucosa-6-fosfato o fructosa-6-fosfato, después de un proceso de isomerización y/o fosforilación (Chavan y Chavan, 2011).

En presencia de aceptores de electrones, las BAL heterofermentativas obligadas reducen la fructosa a manitol y producen

acetato y ATP, mientras que el manitol puede ser fermentado mediante BAL heterofermentativas facultativas para convertirlo en lactato (figura 1). La utilización de pentosas no está restringida al tipo de BAL y de fermentación; las BAL heterofermentativas facultativas, que fermentan hexosas a través de la glucólisis, fermentan las pentosas de la misma manera que las especies heterofermentativas obligadas, con la ayuda de la enzima fructosa-1-6 difosfato aldosa. La fermentación de las pentosas da como resultado la producción de cantidades equimolares de ácido láctico y acético sin la formación de CO_2 (Chavan y Chavan, 2011).

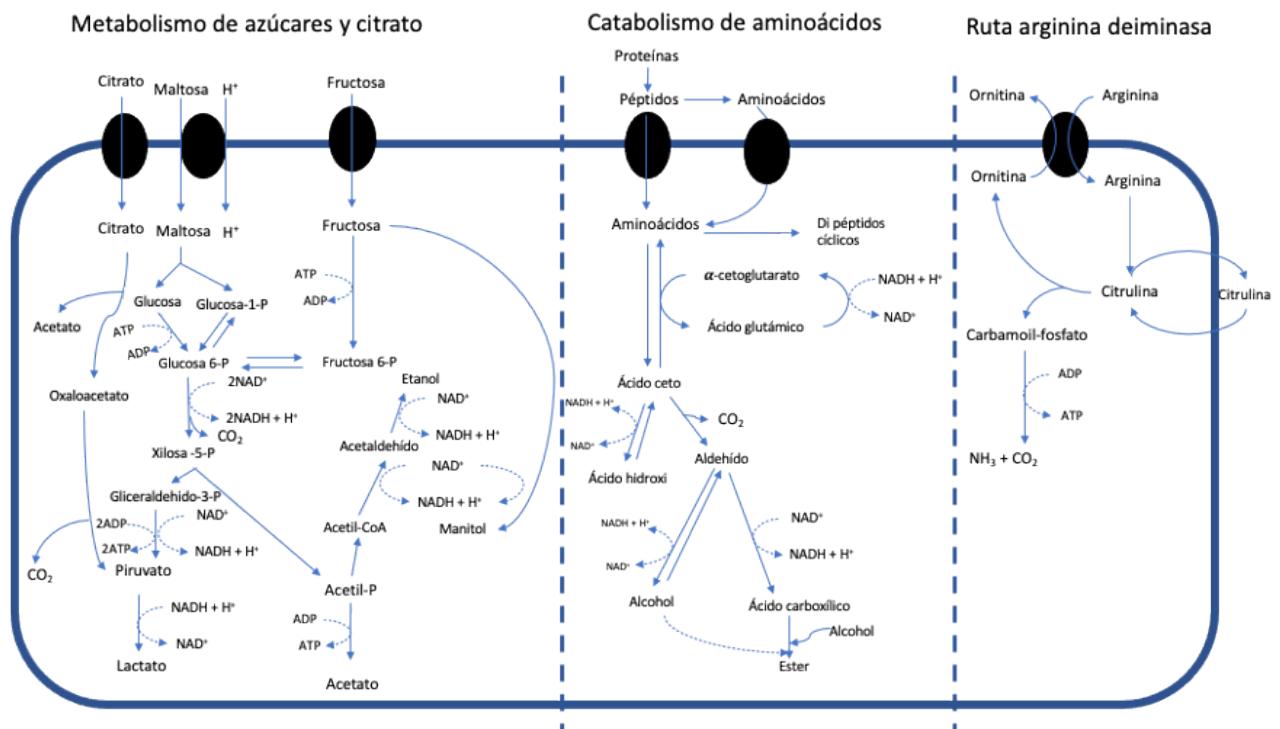


Figura 1.

Principales rutas metabólicas de las bacterias ácido lácticas (BAL) durante la fermentación de las masas madre. Adaptada de Chavan y Chavan (2011).

Por otra parte, las BAL que han sido encontradas en las masas madre poseen proteasas, peptidasas y enzimas convertidoras de aminoácidos, que descomponen las proteínas de los cereales generando tanto compuestos con propiedades bioactivas, como otros que impactan de manera directa el sabor y aroma del pan. El sistema enzimático proteolítico de las BAL consiste en una serina-proteínasa localizada extracelularmente, sistemas de transporte específicos para di/tri-peptidos y oligopéptidos (>3 residuos de aminoácidos) y una multitud de peptidasas intracelulares (Chavan y Chavan, 2011; Gobetti *et al.*, 2014). La transfor-

mación de los aminoácidos por parte de las BAL a compuestos que mejoran el sabor y olor en los panes se produce por reacciones de transaminación (figura 1), que requiere la presencia de un aceptor de electrones y de un grupo amino, preferiblemente α -cetoglutarato. Finalmente, las BAL tienen la capacidad de catabolizar distintos aminoácidos libres, como en el caso de la reacción catabólica que involucra a la fenilalanina, en la cual las enzimas catabólicas de las BAL generan distintos compuestos bioactivos como el fenilactato y el fenilacetato (figura 2) (Chavan y Chavan, 2011; Gobetti *et al.*, 2014).

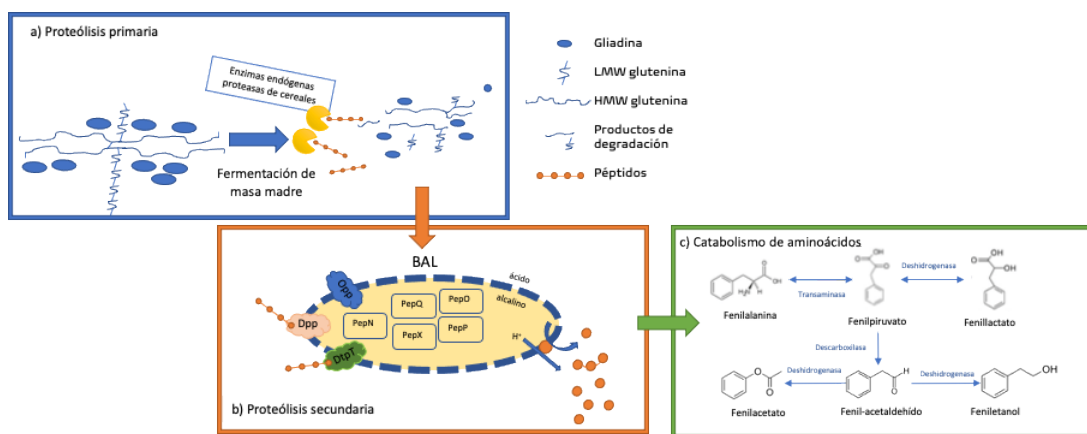


Figura 2.

Metabolismo de las proteínas llevado a cabo por las bacterias ácido lácticas (BAL) durante la fermentación de las masas madre. Adaptada de Gobetti *et al.* (2014).

3. Masas madre y su efecto en las características fisicoquímicas del pan

Se ha observado que los procesos de fermentación de las masas madre juegan un papel relevante en el perfeccionamiento de las características organolépticas del pan. Se ha demostrado que los compuestos formados en las fermentaciones ácido lácticas y su concentración se encuentran directamente relacionados

con la mejora de los sabores, aromas y textura del pan (Chavan y Chavan, 2011; Pétel *et al.*, 2017; Siepmann *et al.*, 2019).

3.1. Textura

En general, la fermentación de las masas madre afecta a la reología de la masa en dos niveles; en la propia masa madre y en la masa final que es adicionada con masa madre (Chavan y Chavan,

2011). Se han realizado diversos estudios sobre el efecto que tiene la adición de masa madre a la formulación de pan en las características de textura finales; se ha observado que este proceso disminuye la resistencia a la extensión y la elasticidad de la masa, y aumenta el grado de ablandamiento, lo cual favorece la obtención de un miga con más capacidad de retención de CO_2 (mayor número de alveolos y de mayor tamaño), una corteza más firme y de mejor textura. Estos cambios, tanto en la estructura de la miga como en la de la masa, han sido atribuidos por varios autores a la proteólisis de las proteínas del gluten provocada más que nada por el aumento de la acidez, gracias a la formación de los ácidos orgánicos durante la fermentación de la masa madre (Di Cagno *et al.*, 2002; Jekle y Becker, 2012; Nutter *et al.*, 2019; Park *et al.*, 2006; Rizzello *et al.*, 2010; Siepmann *et al.*, 2019; Torrieri *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2020).

Por otra parte, muchas de las BAL asociadas a las masas madre, especialmente del género *Lactobacillus*, producen una variedad de exopolisacáridos (EPS) y oligosacáridos durante la fermentación ácido láctica de las mismas. Estos compuestos han demostrado la capacidad para funcionar como hidrocoloides y de esta manera mejorar las características de textura del pan durante el almacenamiento (Chavan y Chavan, 2011). Torrieri *et al.* (2014) evidenciaron que, además de la proteólisis del gluten, la adición de BAL productoras de EPS a la masa madre también mejoró de manera significativa la textura durante el almacenamiento. De igual forma, observaron que los panes adicionados con masas madre fermentadas con este tipo de BAL presentaban un mayor contenido de humedad y mejores propiedades mecánicas, lo cual puede ser una alternativa para disminuir el proceso de envejecimiento de este producto (Torrieri *et al.*, 2014).

3.2. Sabor y olor

Los olores y sabores se generan en la masa madre debido, sobre todo, a procesos enzimáticos y microbianos durante la fermentación de estas masas. Dichos compuestos pertenecen a diferentes clases químicas como aldehídos, ácidos, alcoholes, cetonas, ésteres y pirazinas. Con respecto a los sabores y olores provenientes de las materias primas, estos son insignificantes cuando son comparados con los generados durante el proceso de fermentación; sin embargo, existen otros compuestos aromáticos y de sabor que se producen a partir de los procesos de oxidación de lípidos y reacciones de Maillard (Pétel *et al.*, 2017).

En general, hay dos categorías de compuestos de sabor y aroma que se producen durante la fermentación ácido láctica de las ma-

sas madre; la primera contempla compuestos no volátiles, como los ácidos orgánicos (ácido láctico, ácido acético, ácido feniláctico y ácido fenilacético) que se forman gracias a la acción de las BAL; y los compuestos volátiles que incluyen alcoholes, aldehídos, cetonas, ésteres y compuestos azufrados, que se forman durante las etapas de fermentación y horneado del pan (Chavan y Chavan, 2011; Pétel *et al.*, 2017). Es importante mencionar que la generación de los compuestos aromáticos y de sabor está estrechamente relacionada a factores como el tipo de BAL, la temperatura, el pH y el contenido de humedad, ya que estos influyen de manera directa en la actividad metabólica de los microorganismos, y por consecuencia afectan la concentración final de los compuestos aromáticos y de sabor (Chavan y Chavan, 2011).

Siepmann *et al.* (2019) observaron que al cambiar la temperatura de fermentación (de 28 a 35 °C) en masas madre adicionadas con *Lb. brevis* y *Lb. plantarum*, los panes adicionados con las masas fermentadas a 35 °C presentaban la formación de furfurales, compuestos asociados con aromas almendrados. Por otra parte, los panes elaborados con la masa madre fermentada a 28 °C no presentaron la formación de estos compuestos, lo cual demuestra que la temperatura de fermentación en la masa madre es importante para la formación de compuestos volátiles que repercuten en el sabor y aroma del pan. De igual forma, comprobaron que el tipo de BAL influye significativamente en la generación de sabores y olores finales en el pan; estos investigadores evidenciaron que masas madre fermentadas con *Lb. reuteri*, *Lb. plantarum* y *Lb. amylovorus* generaban una mayor diversidad de compuestos de sabor y olor en el pan, en comparación con los panes adicionados con masas madre fermentadas con *Lb. brevis* y *Lb. plantarum*. Finalmente, Siepmann *et al.* (2019) determinaron que tanto el cultivo iniciador como la temperatura de fermentación de la masa madre ejercen un efecto significativo sobre el aroma y sabor final del pan.

Por otra parte, existen diversas investigaciones en las cuales se han llevado a cabo diferentes análisis sensoriales para conocer la aceptabilidad de distintos tipos de panes adicionados con masas madre. En general, se ha observado que la adición de 20 a 30 % de masa madre a la formulación del pan aumenta la aceptabilidad tanto de textura como de sabor, en comparación con panes elaborados únicamente con levadura. Estos resultados demuestran que los compuestos aromáticos formados durante el proceso de fermentación de las masas madre ayudan a mejorar la aceptabilidad sensorial de los productos de panadería (Park *et al.*, 2006; Rizzello *et al.*, 2010; Cizeikiene *et al.*, 2013; Samapundo *et al.*, 2017).

3.3. Vida útil

Se ha demostrado que las BAL, durante el proceso de fermentación ácido láctica, producen compuestos bioactivos con capacidad antimicrobiana. Se han reportado sustancias como ácidos grasos de cadena corta, compuestos peptídicos, diacetilo, peróxido de hidrógeno y ácidos orgánicos con potencial para la inhibición tanto de bacterias patógenas como de mohos importantes en los alimentos (Coda *et al.*, 2008; Luz *et al.*, 2017; Muhialdin *et al.*, 2018; Rizzello *et al.*, 2011; Schmidt *et al.*, 2018; Shehata *et al.*, 2019; Arrijoja-Bretón *et al.*, 2020). Algunos de estos compuestos se han identificado y aislado en las masas madre, lo que ha dado pie a diversas investigaciones sobre la capacidad que puede presentar la adición de masas madre contra el crecimiento de mohos en el pan, lo cual extendería la vida útil del producto.

Asimismo, se han realizado investigaciones sobre la capacidad que presenta la masa madre, como aditivo, para extender la vida útil de los productos de panadería. En la tabla I se muestran algunos ejemplos de los estudios llevados a cabo en los últimos años. En general se ha demostrado que la adición de 20 % (p/p) de masa madre a la formulación del pan aumenta seis días en promedio la vida útil del producto. Mientras, Garofalo *et al.* (2012) observaron que la adición de 30 % (p/p) de masa madre

en la formulación del pan aumentaba de manera considerable la vida de anaquel del producto, alcanzando mejoras de 19 a 21 días (tabla II). Por otra parte, el tipo de BAL responsable de la fermentación de la masa madre afecta la efectividad en el aumento de la vida útil del pan. Como se puede observar en la tabla II, las masas madre fermentadas con *Lb. amylovorus*, *Lb. rossiae* y una mezcla de *Lb. rossiae* y *Lb. paralimentarius* presentaron la mayor capacidad de aumento de la vida útil del producto final.

Además del crecimiento de mohos, el fenómeno del envejecimiento del pan (retrogradación del almidón y pérdida de humedad) es uno de los factores determinantes para la vida útil de este tipo de productos. Torrieri *et al.* (2014) advirtieron que la adición de 30 % de masa madre fermentada con BAL formadoras de exopolisacáridos a la formulación del pan ayudaba a disminuir la velocidad de pérdida de humedad del producto con el ambiente y tenía un efecto sobre la cinética de retrogradación del almidón. Los investigadores atribuyeron estos resultados a la producción de ácidos orgánicos, la hidrólisis bacteriana (por las BAL) de las moléculas de almidón y la proteólisis de las subunidades de gluten. Finalmente, concluyeron que la adición de masas madre a la formulación del pan podría ser una alternativa para elaborar productos de panadería libres de aditivos sintéticos.

Tabla II. Resultados de mejora de la vida útil del pan observados con la adición de masas madre fermentadas por distintos tipos de bacterias ácido lácticas (BAL)

BAL en masa madre	% Adición de masa madre (p/p)	*Mejora en la vida útil	Referencia
<i>Lb. plantarum</i>	20	2 días	Ryan, Dal Bello y Arendt (2008); Ryan <i>et al.</i> (2011)
<i>Lb. sanfranciscensis</i>	20	2 días	
<i>Lb. amylovorus</i>	20	9 días	
<i>Lb. sakei</i> , <i>Pediococcus acidilactici</i> y <i>Pediococcus pentosaceus</i>	20	6 días	Cizeikiene <i>et al.</i> (2013)
<i>Lb. plantarum</i>	20	1 día	Luz <i>et al.</i> (2019)
<i>Lb. bulgaricus</i>	20	2 días	
<i>Lb. plantarum</i> , <i>L. reuteri</i> y <i>Lb. brevis</i>	30	6 días	Gerez <i>et al.</i> (2009)
<i>Lb. rossiae</i>	30	21 días	Garofalo <i>et al.</i> (2012)
<i>Lb. paralimentarius</i>		8 días	
<i>Lb. rossiae</i> y <i>Lb. paralimentarius</i>		19 días	

* En comparación con panes control que no presentaban la adición de algún agente antimicrobiano.

4. Propiedades de extractos de compuestos bioactivos de masa madre

Los estudios sobre extractos obtenidos a partir de las masas madre se centran en el análisis de la capacidad bioactiva que presentan principalmente los compuestos peptídicos y los ácidos orgánicos formados a partir de la fermentación de BAL en las masas. La obtención de estos extractos y sus distintas fracciones se lleva a cabo a partir del método Osborne (1907) y una separación física por medio de centrifugación; la separación e identificación de los compuestos presentes en dichos extractos comúnmente se obtiene por medio de distintas técnicas instrumentales basadas en la cromatografía (Rizzello *et al.*, 2011; Luz *et al.*, 2019).

Con respecto a los compuestos peptídicos, las peptidasas de las bacterias ácido lácticas presentes en la masa madre participan en la proteólisis secundaria (figura 2) al liberar aminoácidos libres, que a su vez son sometidos a diversas reacciones catabólicas por los mismos microorganismos. Estos compuestos peptídicos, que generalmente aumentan durante la fermentación ácido láctica, son fragmentos de proteínas nativas con secuencias de aminoácidos que pueden tener un impacto positivo como agentes antimicrobianos, antioxidantes y antiinflamatorios (Coda *et al.*, 2008, 2012; Malaguti *et al.*, 2014; Li y Yu, 2015; Zou *et al.*, 2016; Galli *et al.*, 2018).

De igual forma, los ácidos orgánicos identificados y aislados en los extractos de las masas madre presentan propiedades bioactivas, sobre todo funcionando como agentes antimicrobianos en contra de bacterias patógenas importantes en alimentos y mohos característicos del deterioro de los productos de panadería. Esta propiedad genera que los extractos puedan ser utilizados como conservadores «naturales» en el desarrollo de productos libres de aditivos sintéticos o de etiqueta limpia, y de esta manera satisfacer las demandas de los consumidores (Cizeikiene *et al.*, 2013; Demirbaş *et al.*, 2017; Luz *et al.*, 2017; Schmidt *et al.*, 2018).

4.1. Compuestos bioactivos con propiedades antimicrobianas

Como se mencionó anteriormente, los ácidos orgánicos y compuestos peptídicos formados durante la fermentación ácido láctica de las masas madre han demostrado tener una capaci-

dad antimicrobiana cuando son utilizados como compuestos puros, de manera individual o conjunta, en estudios *in vitro* (Ryan *et al.*, 2008; Cizeikiene *et al.*, 2013; Muhialdin *et al.*, 2018; Shehata *et al.*, 2019; Garnier *et al.*, 2020). Por esta razón, se han realizado diversas investigaciones sobre la capacidad antifúngica que presentan, no solo los compuestos puros, sino los extractos acuosos obtenidos a partir de masas madre sobre las especies de mohos representativos del deterioro del pan; en la tabla III se muestran los compuestos bioactivos identificados en los extractos de masas madre que han presentado una actividad antifúngica *in vitro* contra algunos mohos.

Ácidos orgánicos como el ácido láctico, acético y feniláctico identificados en masas madre fermentadas con *Lb. reuteri*, *Lb. plantarum* y *Lb. brevis* presentaron un efecto antifúngico significativo disminuyendo el crecimiento radial de mohos como *Fusarium graminearum* y *Aspergillus niger* (tabla III). A su vez, al ser incorporadas estas masas madre a la formulación del pan, ayudaron a aumentar la vida de anaquel del producto en siete días con respecto a panes control (Gerez *et al.*, 2009). De igual forma, Axel *et al.* (2016) y Luz *et al.* (2019) identificaron otro tipo de ácidos orgánicos, los cuales inhibían el crecimiento de mohos en la superficie del pan y de esta manera incrementaban la vida de anaquel del producto (tabla III).

Por otra parte, han sido reconocidos algunos compuestos peptídicos en masas madre fermentadas con BAL (tabla III); estos han presentado la capacidad para inhibir el crecimiento de mohos como *Penicillium roqueforti*, *Aspergillus parasiticus*, *Penicillium polonicum* y *Penicillium paneum* en rebanadas de pan. Además, se ha demostrado la capacidad de los compuestos peptídicos para aumentar hasta siete días la vida de anaquel en productos de panadería (Coda *et al.*, 2011; Rizzello *et al.*, 2011).

Asimismo, han sido aisladas bacteriocinas producidas por las BAL a partir de los extractos acuosos de masas madre. Una de las bacteriocinas distinguidas en estas masas es la reuteriicina, la cual es producida por la BAL *Lactobacillus reuteri* LTH2584; este compuesto ha demostrado tener una capacidad antibacteriana importante contra bacterias como *Listeria monocytogenes*, *Bacillus subtilis* y *Staphylococcus aureus* (Höltzel *et al.*, 2000). Otras bacteriocinas aisladas en extractos acuosos de masas madre con capacidad antibacteriana son la bavaricina A producida por *Lb. bavaricus* M1401, la plantaricina

Tabla III. Compuestos bioactivos identificados en masas madre fermentadas con distintas bacterias ácido lácticas (BAL) y su efecto contra mohos representativos del deterioro del pan

BAL identificada	Compuestos bioactivos identificados	Efecto antimicrobiano contra	Principales observaciones	Referencia
<i>Lb. reuteri</i> , <i>Lb. plantarum</i> y <i>Lb. brevis</i>	Ácido láctico, ácido acético y ácido feniláctico	<i>Fusarium graminearum</i> y <i>Aspergillus niger</i>	Inhibición en el crecimiento radial (>70 %) de <i>F. graminearum</i> y disminución (>40 %) del crecimiento radial de <i>A. niger</i> . Aumento de la vida de anaquel en panes adicionados con masa madre de 2-3 días con respecto a pan control.	Gerez et al. (2009)
<i>Lb. plantarum</i>	Secuencia de péptidos: SAFEFADHKGAYS, AAHFGSIFWNV GMKR, AEGEVILEDVQPSSVQS, y PPDVLTKLTAVPAAQQLDEADGHPR.	<i>Penicillium roqueforti</i> , <i>Aspergillus parasiticus</i> y <i>Penicillium polonicum</i>	Aumento de la vida de anaquel del pan de siete días con respecto al control. Inhibición de crecimiento radial de los mohos entre 50-60 % en ensayos <i>in vitro</i> .	Coda et al. (2011)
<i>Lb. plantarum</i> y <i>Lb. rossiae</i> LB5	Compuestos peptídicos: Temporiina-Sha Temporina-1Gc Expansin-B4 (Q94LR4) Ácidos orgánicos: • Ácido láctico • Ácido fórmico • Ácido acético • Ácido feniláctico	<i>Penicillium roqueforti</i> , <i>Penicillium paneum</i> y <i>Aspergillus parasiticus</i>	Aumento de la vida de anaquel del pan de 7-14 días con respecto al control. Actividad inhibitoria de 40-45 % en contra de los mohos <i>P. roqueforti</i> , <i>P. paneum</i> y <i>A. parasiticus</i> .	Rizzello et al. (2011)
<i>Lb. reuteri</i>	Ácido 4-hidroxifeniláctico, ácido 2-hidroxi-isocaproico, ácido vainillínico y ácido 3-feniláctico	Mohos del ambiente	Aumento de la vida de anaquel en rebanadas de pan de 7-8 días con respecto al control.	Axel et al. (2016)
<i>Lb. brevis</i>	Ácido 2-hidroxi-isocaproico y ácido vainillínico	Mohos del ambiente	Aumento de la vida de anaquel en rebanadas de pan de 5-6 días con respecto al control.	
<i>Lb. plantarum</i>	Ácido gálico, ácido clorogénico, ácido cafeico y ácido siríngico	<i>Penicillium expansum</i> , <i>Penicillium roqueforti</i> y <i>Fusarium moniliformis</i>	Aumento de la vida de anaquel en rebanadas de pan de 3-4 días con respecto al control.	Luz et al. (2019)
<i>Lb. bulgaricus</i>	Ácido sinapínico y ácido DL-3-feniláctico	<i>Fusarium moniliformis</i> y <i>Penicillium expansum</i>	Aumento de la vida de anaquel en rebanadas de pan de 4-5 días con respecto al control.	

ST31 producida por *Lb. plantarum*, y la BLIS C57 producida por *Lb. sanfranciscensis* C57. Si bien estas bacteriocinas no han sido aprobadas para su uso como aditivos antimicrobianos o antifúngicos, el estudio de su capacidad antimicrobiana y su seguridad en el uso en alimentos puede generar una alternativa para reemplazar el uso de sustancias antimicrobianas sintéticas como conservadores (Chavan y Chavan, 2011).

4.2. Estudios sobre los efectos de los compuestos bioactivos sobre la vida útil del pan

A pesar de la existencia de diversas investigaciones sobre la capacidad antifúngica *in vitro* de compuestos bioactivos formados por las BAL aisladas de masas madre, sembradas en caldos de cultivo específicos a nivel laboratorio, son escasos los estudios sobre esta capacidad cuando son obtenidos a partir de extractos de masa madre e incorporados en el pan para analizar su vida útil (Cizeikiene *et al.*, 2013; Valerio *et al.*, 2016; Demirbaş *et al.*, 2017; Luz *et al.*, 2017; Schmidt *et al.*, 2018).

Coda *et al.* (2011) demostraron que la adición de los extractos acuosos de masas madre fermentadas con *Lb. plantarum* provocaba un aumento en tiempo de aparición de mohos en panes inoculados con *Penicillium roqueforti* y sin inocular, de siete y 21 días, respectivamente. Por otra parte, Rizello *et al.* (2011) observaron que la adición a la formulación del pan de 4 % (p/p) de extracto liofilizado obtenido de masas madre fermentadas con *Lb. rossiae* y *Lb. plantarum* inhibía el crecimiento de mohos por alrededor de 28 días de almacenamiento a temperatura ambiente. De igual manera, estos investigadores concluyeron que la actividad antifúngica del extracto se debía a la actividad sinérgica y compleja entre los ácidos orgánicos y los compuestos peptídicos formados durante la fermentación ácido láctica. Estos resultados abren la posibilidad de obtener compuestos antifúngicos a partir de los extractos de masas madre fermentadas, los cuales pueden ser elaborados con materias primas accesibles y de menor costo, y ser utilizados como antimicrobianos naturales en una gran gama de productos alimenticios.

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Aunque sigue siendo un proceso tradicional, la adición de masas madre a la formulación de productos de panadería representa una opción eficaz para mejorar sus características. La utilización de estas masas como ingredientes en la formulación del pan mejora de manera significativa las características organolépticas del producto y ayuda a mantener su vida útil, disminuyendo la velocidad del proceso de envejecimiento. Estas mejoras se atribuyen principalmente a la formación de compuestos como ácidos orgánicos, compuestos peptídicos y/o exopolisacáridos durante la fermentación ácido láctica en la masa madre.

Otra ventaja atribuida al uso de las masas madre es su capacidad para prolongar la vida de anaquel del pan, debido a que los ácidos orgánicos y los compuestos peptídicos tienen una condición antimicrobiana que inhibe el crecimiento de los principales mohos que deterioran este producto. En este sentido, las investigaciones sobre el uso de los extractos que contienen los compuestos bioactivos para alargar la vida útil del pan han presentado resultados favorables; sin embargo, estos trabajos son insuficientes, por lo que complementar la información con nuevas investigaciones resulta relevante para la obtención de compuestos antimicrobianos naturales que puedan ser utilizados no solo en panadería, sino también en otros productos alimenticios.

AGRADECIMIENTOS

R. H. Hernández Figueroa 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 de sus estudios de posgrado y el apoyo para realizar este trabajo.

REFERENCIAS

- Arrijoa-Bretón, D., Mani-López, E., Palou, E. y López-Malo, A. (2020). Antimicrobial activity and storage stability of cell-free supernatants from lactic acid bacteria and their applications with fresh beef. *Food Control*, 115. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107286>
- Axel, C., Brosnan, B., Zannini, E., Furey, A., Coffey, A. y Arendt, E. K. (2016). Antifungal sourdough lactic acid bacteria as biopreservation tool in quinoa and rice bread. *International Journal of Food Microbiology*, 239, 86-94. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.05.006>
- Cauvain, S. P. y Young, L. S. (2003). Water control in baking. In *Bread Making: Improving Quality*, 447-466.
- Chavan, R. S. y Chavan, S. R. (2011). Sourdough Technology-A Traditional Way for Wholesome Foods: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 10(3), 169-182. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2011.00148.x>
- Cizeikiene, D., Juodeikiene, G., Paskevicius, A. y Bartkiene, E. (2013). Antimicrobial activity of lactic acid bacteria against pathogenic and spoilage microorganism isolated from food and their control in wheat bread. *Food Control*, 31(2), 539-545. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.12.004>
- Coda, R., Cassone, A., Rizzello, C. G., Nionelli, L., Cardinali, G. y Gobbetti, M. (2011). Antifungal activity of *Wickerhamomyces anomalus* and *Lactobacillus plantarum* during sourdough fermentation: Identification of novel compounds and long-term effect during storage of wheat bread. *Applied and Environmental Microbiology*, 77(10), 3484-3492. <https://doi.org/10.1128/AEM.02669-10>
- Coda, R., Rizzello, C. G., Nigro, F., De Angelis, M., Arnault, P. y Gobbetti, M. (2008). Long-term fungal inhibitory activity of water-soluble extracts of *Phaseolus vulgaris* cv. Pinto and sourdough lactic acid bacteria during bread storage. *Applied and Environmental Microbiology*, 74(23), 7391-7398. <https://doi.org/10.1128/AEM.01420-08>
- Coda, R., Rizzello, C. G., Pinto, D. y Gobbetti, M. (2012). Selected lactic acid bacteria synthesize antioxidant peptides during sourdough fermentation of cereal flours. *Applied and Environmental Microbiology*, 78(4), 1087-1096. <https://doi.org/10.1128/AEM.06837-11>
- Corsetti, A. y Settanni, L. (2007). Lactobacilli in sourdough fermentation. *Food Research International*, 40(5), 539-558. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2006.11.001>
- De Vuyst, L. y Neysens, P. (2005). The sourdough microflora: Biodiversity and metabolic interactions. *Trends in Food Science and Technology*, 16(1-3), 43-56. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2004.02.012>
- Demirbaş, F., İspirli, H., Kurnaz, A. A., Yilmaz, M. T. y Dertli, E. (2017). Antimicrobial and functional properties of lactic acid bacteria isolated from sourdoughs. *LWT - Food Science and Technology*, 79, 361-366. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.01.067>
- Di Cagno, R., De Angelis, M., Lavermicocca, P., De Vincenzi, M., Giovannini, C., Faccia, M. y Gobbetti, M. (2002). Proteolysis by sourdough lactic acid bacteria: Effects on wheat flour protein fractions and gliadin peptides involved in human cereal intolerance. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(2), 623-633. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.2.623-633.2002>
- Galli, V., Mazzoli, L., Luti, S., Venturi, M., Guerrini, S., Paoli, P., Vincenzini, M., Granchi, L. y Pazzagli, L. (2018). Effect of selected strains of lactobacilli on the antioxidant and anti-inflammatory properties of sourdough. *International Journal of Food Microbiology*, 286, 55-65. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.07.018>
- Gänzle, M. y Ripari, V. (2016). Composition and function of sourdough microbiota: From ecological theory to bread quality. *International Journal of Food Microbiology*, 239, 19-25. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.05.004>
- García, M. V., Bernardi, A. O. y Copetti, M. V. (2019). The fungal problem in bread production: insights of causes, consequences, and control methods. *Current Opinion in Food Science*, 29, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.06.010>
- Garnier, L., Penland, M., Thierry, A., Maillard, M. B., Jardin, J., Coton, M., Leyva Salas, M., Coton, E., Valence, F. y Mounier, J. (2020). Antifungal activity of fermented dairy ingredients: Identification of antifungal compounds. *International Journal of Food Microbiology*, 322. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108574>
- Garofalo, C., Zannini, E., Aquilanti, L., Silvestri, G., Fierro, O., Picariello, G. y Clementi, F. (2012). Selection of sourdough lactobacilli with antifungal activity for use as biopreservatives in bakery products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(31), 7719-7728. <https://doi.org/10.1021/jf301173u>
- Gerez, C. L., Torino, M. I., Rollán, G. y Font de Valdez, G. (2009). Prevention of bread mould spoilage by using lactic acid bacteria with antifungal properties. *Food Control*, 20(2), 144-148. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2008.03.005>
- Gobbetti, M., Rizzello, C. G., Di Cagno, R. y De Angelis, M. (2014). How the sourdough

- may affect the functional features of leavened baked goods. *Food Microbiology*, 37, 30-40. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2013.04.012>
- Höltzel, A., Gänzle, M. G., Nicholson, G. J., Hammes, W. P. y Jung, G. (2000). The First Low Molecular Weight Antibiotic from Lactic Acid Bacteria: Reutericyclin, a New Tetramic Acid. *Angewandte Chemie International Edition*, 39(15), 2766-2768. [https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20000804\)39:15<2766::AID-ANIE2766>3.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/1521-3773(20000804)39:15<2766::AID-ANIE2766>3.0.CO;2-G)
- Jay, J. M. (2005). Modern Food Microbiology. *Modern Food Microbiology*.
- Jekle, M. y Becker, T. (2012). Effects of Acidification, Sodium Chloride, and Moisture Levels on Wheat Dough: II. Modeling of Bread Texture and Staling Kinetics. *Food Biophysics*, 7(3), 200-208. <https://doi.org/10.1007/s11483-012-9258-7>
- Lai, H. M. y Lin, T. C. (2007). Bakery Products: Science and Technology. In *Bakery Products: Science and Technology*. <https://doi.org/10.1002/9780470277553.ch1>
- Li, Y. y Yu, J. (2015). Research Progress in Structure-Activity Relationship of Bioactive Peptides. *Journal of Medicinal Food*, 18(2), 147-156. <https://doi.org/10.1089/jmf.2014.0028>
- Lin, X. B. y Gänzle, M. G. (2014). Quantitative high-resolution melting PCR analysis for monitoring of fermentation microbiota in sourdough. *International Journal of Food Microbiology*, 186, 42-48. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.06.010>
- Luz, C., D'Opazo, V., Mañes, J. y Meca, G. (2019). Antifungal activity and shelf life extension of loaf bread produced with sourdough fermented by *Lactobacillus* strains. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(10). <https://doi.org/10.1111/jfpp.14126>
- Luz, C., Saladino, F., Luciano, F. B., Mañes, J. y Meca, G. (2017). *In vitro* antifungal activity of bioactive peptides produced by *Lactobacillus plantarum* against *Aspergillus parasiticus* and *Penicillium expansum*. *LWT - Food Science and Technology*, 81, 128-135. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.03.053>
- Magan, N., Arroyo, M. y Aldred, D. (2003). Mould prevention in bread. In *Bread Making: Improving Quality*, 500-514.
- Malaguti, M., Dinelli, G., Leoncini, E., Bregola, V., Bosi, S., Cicero, A. F. G. y Hrelia, S. (2014). Bioactive peptides in cereals and legumes: Agronomical, biochemical and clinical aspects. *International Journal of Molecular Sciences*, 15(11), 21120-21135. <https://doi.org/10.3390/ijms151121120>
- Manini, F., Casiraghi, M. C., Poutanen, K., Brasca, M., Erba, D. y Plumed-Ferrer, C. (2016). Characterization of lactic acid bacteria isolated from wheat bran sourdough. *LWT - Food Science and Technology*, 66, 275-283. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.10.045>
- Minervini, F., Lattanzi, A., De Angelis, M., Di Cagno, R. y Gobbetti, M. (2012). Influence of artisan bakery- or laboratory-propagated sourdoughs on the diversity of lactic acid bacterium and yeast microbiotas. *Applied and Environmental Microbiology*, 78(15), 5328-5340. <https://doi.org/10.1128/AEM.00572-12>
- Muhalidin, B. J., Hassan, Z. y Saari, N. (2018). *In vitro* antifungal activity of lactic acid bacteria low molecular peptides against spoilage fungi of bakery products. *Annals of Microbiology*, 68(9), 557-567. <https://doi.org/10.1007/s13213-018-1363-x>
- Nutter, J., Saiz, A. I. y Lurlina, M. O. (2019). Microstructural and conformational changes of gluten proteins in wheat-rye sourdough. *Journal of Cereal Science*, 87, 91-97. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.03.006>
- Osborne, T. B. (1907). The proteins of the wheat kernel. Carnegie Institute, Washington D. C.
- Park, Y.-H., Jung, L.-H. y Jeon, E.-R. (2006). Quality Characteristics of Bread Using Sour Dough. *Preventive Nutrition and Food Science*, 11(4), 323-327. <https://doi.org/10.3746/jfn.2006.11.4.323>
- Pétel, C., Onno, B. y Prost, C. (2017). Sourdough volatile compounds and their contribution to bread: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 59, 105-123. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.10.015>
- Rizzello, C. G., Cassone, A., Coda, R. y Gobbetti, M. (2011). Antifungal activity of sourdough fermented wheat germ used as an ingredient for bread making. *Food Chemistry*, 127(3), 952-959. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.01.063>
- Rizzello, C. G., Nionelli, L., Coda, R., Di Cagno, R. y Gobbetti, M. (2010). Use of sourdough fermented wheat germ for enhancing the nutritional, texture and sensory characteristics of the white bread. *European Food Research and Technology*, 230(4), 645-654. <https://doi.org/10.1007/s00217-009-1204-z>
- Ryan, L. A. M., Dal Bello, F. y Arendt, E. K. (2008). The use of sourdough fermented by antifungal LAB to reduce the amount of calcium propionate in bread. *International Journal of Food Microbiology*, 125(3), 274-278. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2008.04.013>
- Ryan, L. A. M., Zannini, E., Dal Bello, F., Pawlowska, A., Koehler, P. y Arendt, E. K. (2011). *Lactobacillus amylovorus* DSM 19280 as a novel food-grade antifungal agent for bakery products. *International Journal of Food Microbiology*, 146(3), 276-283. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2011.02.036>
- Sakandar, H. A., Hussain, R., Kubow, S., Sadiq, F. A., Huang, W. y Imran, M. (2019).

- Sourdough bread: A contemporary cereal fermented product. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(3), 1-15. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13883>
- Samapundo, S., Devlieghere, F., Vroman, A. y Eeckhout, M. (2017). Antifungal activity of fermentates and their potential to replace propionate in bread. *LWT - Food Science and Technology*, 76, 101-107. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.10.043>
- Saranraj, P. y Sivasakthivelan, P. (2015). Microorganisms involved in spoilage of bread and its control measures. In *Bread and its Fortification: Nutrition and Health Benefits*, 132-149.
- Schmidt, M., Lynch, K. M., Zannini, E. y Arendt, E. K. (2018). Fundamental study on the improvement of the antifungal activity of *Lactobacillus reuteri* R29 through increased production of phenyllactic acid and reuterin. *Food Control*, 88, 139-148. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.11.041>
- Shehata, M. G., Badr, A. N., El Sohaimy, S. A., Asker, D. y Awad, T. S. (2019). Characterization of antifungal metabolites produced by novel lactic acid bacterium and their potential application as food biopreservatives. *Annals of Agricultural Sciences*, 64(1), 71-78. <https://doi.org/10.1016/j.a0as.2019.05.002>
- Siepmann, F. B., Sousa de Almeida, B., Waszczynskyj, N. y Spier, M. R. (2019). Influence of temperature and of starter culture on biochemical characteristics and the aromatic compounds evolution on type II sourdough and wheat bread. *LWT* 108, 199-206. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.03.065>
- Su, X., Wu, F., Zhang, Y., Yang, N., Chen, F., Jin, Z. y Xu, X. (2019). Effect of organic acids on bread quality improvement. *Food Chemistry*, 278, 267-275. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.011>
- Torrieri, E., Pepe, O., Ventrino, V., Masi, P. y Cavella, S. (2014). Effect of sourdough at different concentrations on quality and shelf life of bread. *LWT - Food Science and Technology*, 56(2), 508-516. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.12.005>
- Valerio, F., Di Biase, M., Lattanzio, V. M. T. y Lavermicocca, P. (2016). Improvement of the antifungal activity of lactic acid bacteria by addition to the growth medium of phenylpyruvic acid, a precursor of phenyllactic acid. *International Journal of Food Microbiology*, 222, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.01.011>
- Zhao, Y., Zhang, J., Wei, Y., Ai, L., Ying, D. y Xiao, X. (2020). Improvement of Bread Quality by Adding Wheat Germ Fermented with *Lactobacillus plantarum* dy-1. *Journal of Food Quality*. <https://doi.org/10.1155/2020/9348951>
- Zou, T. Bin, He, T. P., Li, H. Bin, Tang, H. W. y Xia, E. Q. (2016). The structure-activity relationship of the antioxidant peptides from natural proteins. *Molecules*, 21(1), 1-14. <https://doi.org/10.3390/molecules21010072>



Principios y aplicaciones de luz ultravioleta

para el procesamiento de alimentos líquidos en operación continua: parámetros de diseño y operación

C. Pihen-Martínez* y N. Ramírez-Corona

*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos
Correos electrónicos: christelle.pihenmz@udlap.mx · nelly.ramirez@udlap.mx

RESUMEN

Los tratamientos con luz ultravioleta a baja presión (UV-BPU), diodos emisores de luz ultravioleta (UV-LEDs) y pulsos de luz (PL), son tecnologías no térmicas que utilizan radiación ultravioleta en diferentes arreglos y longitudes de onda electromagnética para la inactivación de microorganismos en sistemas alimentarios. A pesar de que cada uno de ellos presenta ventajas y desventajas en su aplicación a gran escala para el procesamiento de alimentos líquidos, diversos estudios han demostrado el potencial de estas tecnologías para reemplazar los tratamientos tradicionales de pasteurización. Su efectividad es dependiente de las características de la matriz de la muestra y de la optimización de los parámetros de operación. Además, se ha observado que la configuración de los equipos tiene un efecto importante en la eficiencia del tratamiento, y se ha reportado un efecto sinérgico cuando estas tecnologías que aplican radiación UV se combinan con tratamientos térmicos y no térmicos, incrementando la eficiencia tanto en la inactivación de microorganismos como en la preservación de características de calidad en los alimentos líquidos tratados. A pesar de los resultados favorables que estas tecnologías presentan, aún existen áreas de oportunidad referentes a la configuración de los equipos, combinación de tratamientos y escalamiento de los mismos, así como para la investigación de tratamientos de UV-LEDs, particularmente para sistemas con operación en continuo.

Palabras clave: radiación ultravioleta, UV-LEDs, pulso de luz, luz ultravioleta a baja presión, tratamiento térmico, sistema de operación continua, alimentos líquidos.

ABSTRACT

Low pressure ultraviolet light (UV-LP), ultraviolet light emitting diodes (UV-LEDs) and pulsed light (PL) treatments are non-thermal technologies that use ultraviolet radiation in different arrangements and electromagnetic wavelengths for the inactivation of microorganisms in food systems. Even though each of them has advantages and disadvantages in their large-scale application for processing liquid food, several studies have demonstrated the potential of these technologies to replace traditional pasteurization treatments. Their effectiveness is dependent on the characteristics of the sample matrix and the optimization of the operating parameters. Moreover, it has been observed the effect of equipment configuration on the treatment effectiveness, as well as the synergistic effect between technologies that apply UV radiation combined with thermal and non-thermal treatment in increasing inactivation efficiency and preserving quality characteristics in treated liquid foods. Despite the favorable results of these technologies, there are still areas of opportunity regarding equipment configuration, combination of treatments and scaling up, as well as in research on UV-LEDs treatments, particularly for systems operating in a continuous mode.

Keywords: UV radiation, UV-LEDs, pulsed light, low pressure ultraviolet light, thermal treatment, continuous operation system, liquid food.

INTRODUCCIÓN

La radiación ultravioleta (UV) forma parte del espectro electromagnético con una longitud de onda entre 100 y 400 nm (Gómez-López *et al.*, 2012). A pesar de ser una tecnología que se desarrolló en 1906 para la desinfección de agua potable (Masschelein y Rice, 2002), su estudio en el área alimentaria, así como el diseño de nuevos equipos que emplean radiación UV para el procesamiento de alimentos líquidos, es reciente (Ye *et al.*, 2007; Forney *et al.*, 2008; Mansor *et al.*, 2014; Jarvis *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2019). La actual demanda por parte de los consumidores respecto a la comercialización de alimentos inocuos, procesados mediante técnicas que tengan un impacto mínimo en las propiedades nutrimentales y sensoriales de los alimentos procesados, ha generado que la industria alimentaria busque reemplazar técnicas tradicionales de pasteurización de alimentos por tratamientos no térmicos, entre los cuales destacan los métodos que aplican rayos UV como fuente de irradiación, no solo por su potencial germicida, sino también por la retención de propiedades sensoriales y nutrimentales de interés para los consumidores (Bhavaya y Umesh Hebbar, 2017; A. Chevremont, Farnet da Silva, Coulomb, *et al.*, 2019; Koutchma, 2010; Rifna *et al.*, 2019; Vollmer *et al.*, 2020).

El tratamiento mediante luz UV es un método libre de productos químicos y efluentes residuales que utiliza radiación no ionizante como fuente de irradiación, lo cual lo hace amigable con el medio ambiente (Gómez-López *et al.*, 2007; Bhavaya y Hebbar, 2017; Minh *et al.*, 2019). Además, este tipo de tratamientos es adecuado para el procesamiento de alimentos líquidos, principalmente en operación continua, dado que, en los alimentos sólidos, los rayos UV solo logran penetrar la superficie del producto tratado, mientras que en alimentos líquidos tratados por flujo continuo se logra homogeneizar el producto y con ello alcanzar una mayor superficie de inactivación (Xu *et al.*, 2019; Kim y Kang, 2021; Pierscianowski *et al.*, 2021).

En vista de su gran potencial en la industria de alimentos líquidos, en los últimos años se han desarrollado nuevos equipos que utilizan este tipo de radiación como método de pasteurización, pero con variantes en la fuente de irradiación. Entre estas tecnologías se encuentran los equipos de pulsos de luz (PL), los cuales usan lámparas de xenón como fuente de luz de amplio espectro, o métodos más recientes como diodos emisores de luz ultravioleta (UV-LEDS), que emiten fotones en múltiples longitudes de onda dentro del rango UV, ambos como alternativa a la aplica-

ción de radiación UV a partir de lámparas con vapor de mercurio a baja presión (Kheyrandish *et al.*, 2018; Roobab *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2019; Mandal *et al.*, 2020; Kim y Kang, 2021).

Por otra parte, la eficiencia de cada una de estas tecnologías dependerá del diseño y parámetros de operación empleados en los tratamientos, la matriz del alimento, el tipo de microorganismo presente en el producto, así como en las condiciones de operación; entre ellos el tiempo de tratamiento, el rango de longitud de onda utilizado en cada equipo o la distancia entre la muestra y la fuente de irradiación (Krishnamurthy *et al.*, 2007; Keklik y Krishnamurthy, 2012; Levy *et al.*, 2012; Ouyang *et al.*, 2020).

Finalmente, se ha comprobado que las tecnologías emergentes que emplean luz UV como fuente de irradiación no solo tienen un efecto positivo en los compuestos termosensibles, como la conservación de vitaminas y compuestos aromáticos, sino que también parecen no tener efecto negativo en algunas características fisicoquímicas como el color, el pH o los °Bx (Chaine *et al.*, 2012; Chemat *et al.*, 2017; Gabrić *et al.*, 2018; Koutchma, 2019a; Rifna *et al.*, 2019; Mandal *et al.*, 2020; Gouma *et al.*, 2020).

Este artículo proporcionará una descripción de los principios fundamentales de aplicación de UV-BP, PL y UV-LEDS para la pasteurización de alimentos líquidos, así como el mecanismo y eficiencia de la inactivación microbiana de cada uno, su efecto sobre los parámetros nutricionales y de calidad en los alimentos líquidos, los diseños y sistemas de operación disponibles, además de ejemplos de sus aplicaciones tanto de manera individual como en combinación con otras tecnologías emergentes, con el fin de analizar las ventajas y desventajas de los tratamientos que emplean radiación UV.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. Principio de las tecnologías emergentes que emplean radiación ultravioleta

La luz UV es una forma de luz no visible para el ojo humano que está entre el espectro de los rayos X y la luz visible (figura 1). Constituye parte del espectro electromagnético que se encuentra entre el rango de 100 a 400 nm, el cual a su vez puede clasificarse en cuatro grupos dependiendo de la longitud de onda emitida o el nivel de energía en los fotones, los cuales corresponden a luz UV-A, UV-B, UV-C y UV de vacío, donde cada tipo de luz UV tiene un efecto específico a nivel microbiológico y macromolecular (tabla I).

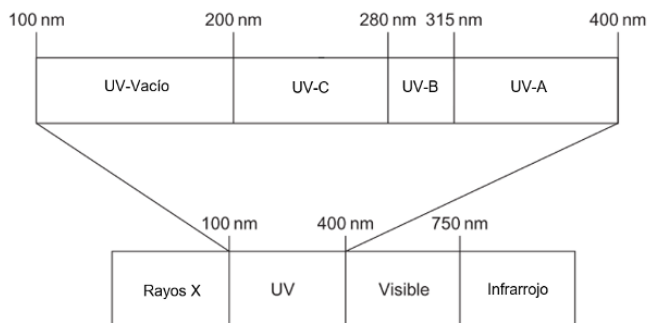


Figura 1.

Niveles del espectro electromagnético a diferentes longitudes de onda de la luz ultravioleta. Adaptada de Gómez-López *et al.* (2012).

La acción bactericida de la luz uv depende de la longitud de onda aplicada, la cual a su vez es proporcional a la energía del fotón, donde longitudes de onda más largas dan lugar a una menor energía del fotón y, como consecuencia, a una menor profundidad de penetración en las células microbianas (tabla I) (Gómez-López *et al.*, 2007, 2012; Koutchma *et al.*, 2019; Souza y Koutchma, 2020).

El efecto germicida de la radiación uv no solo deriva del rango de luz aplicado a los microorganismos, sino también de la sensibilidad de cada microorganismo a la luz uv, dependiendo de la estructura de la pared celular, el espesor, la composición y la existencia o no de proteínas que absorben luz uv. Del mismo modo, la sensibilidad de los microorganismos a la radiación uv

se ve afectada por las diferencias en la estructura de los ácidos nucleicos y el mecanismo de reparación del ADN o fotorreactivación, cuando se aplican bajas dosis de uv. Existen dos tipos de reparación del ADN en los microorganismos: la fotorreactivación y la reparación oscura. La fotorreactivación es el principal proceso de reparación del ADN, donde las fotoenzimas son capaces de reparar dímeros de ciclobutano pirimidina (CPD) al absorber energía luminosa en la longitud de onda entre 310 y 480 nm (UV-A o luz visible parcial) (Li *et al.*, 2019). Por otro lado, la reparación oscura es un proceso que no requiere luz y es capaz de reemplazar los nucleótidos de ADN dañados con ADN nuevo, lo cual causa efectos germicidas mínimos en los productos tratados por uv (Bolton y Cotton, 2008).

Debido a lo anterior, se ha observado que el orden de resistencia de los microorganismos a la radiación uv se puede ordenar según la siguiente jerarquía: bacterias Gram negativas <bacterias Gram positivas <levaduras <esporas bacterianas <mohos <virus, donde las esporas de hongos o bacterias con pigmentaciones oscuras tienen mayor resistencia a los tratamientos por radiación uv (Rowan, Gregor, Anderson, Fouracre, e Ilvaney, 1999; Anderson, Rowan, MacGregor, Fouracre, y Parish, 2000; Levy, Aubert, Lacour, y Carlin, 2012; Souza y Koutchma, 2020).

Sin embargo, la eficiencia de los tratamientos mediante radiación uv no solo depende del tipo de microorganismo, sino también de la cepa, la etapa de cultivo y la densidad de cada uno, así como de las características del medio de crecimiento, siendo la transmitancia del producto uno de los factores más importantes de la muestra, pues determina la efectividad de los tratamientos por uv (Souza y Koutchma, 2020).

Tabla I. Clasificación de la luz ultravioleta en función del rango de espectro electromagnético, el nivel de energía de los fotones en cada tipo de luz uv y su efecto en las células de los microorganismos y a nivel macromolecular

Tipo de luz uv	Rango de espectro (nm)	Nivel de energía de los fotones (eV)	Efecto en la célula	Efecto a nivel macro
UV-A	400-315	3.10-3.87	Mayor producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) como radicales hidroxilos y oxígeno, provoca daño oxidativo a los lípidos de la membrana celular, proteínas de la membrana y efectos indirectos sobre el ADN.	Genera cambios de coloración en piel.
UV-B	315-280	3.87-4.43	Induce la formación de lesiones en el ADN (fotoproductos), lo que provoca daño directo en el ADN, bloquea la replicación del ADN y la transcripción del ARN e induce estrés oxidativo y daño de lípidos.	Genera quemaduras y en exposición prolongada puede provocar cáncer.

Tabla 1. Clasificación de la luz ultravioleta en función del rango de espectro electromagnético, el nivel de energía de los fotones en cada tipo de luz UV y su efecto en las células de los microorganismos y a nivel macromolecular (continuación)

Tipo de luz UV	Rango de espectro (nm)	Nivel de energía de los fotones (eV)	Efecto en la célula	Efecto a nivel macro
UV-C	280-200	4.43-6.20	Logra producir alteraciones en el ADN por los dímeros pirimidina, citocina y la elevada cantidad de dímeros de timina, los cuales inhiben la formación de nuevas cadenas de ADN en la replicación celular y la transcripción de ADN. Ello provoca la muerte de los microorganismos.	Inactivación de bacterias, virus, levaduras, mohos, esporas, protozoos y algas.
UV-vacío	200-100	-	Esta radiación solo puede estar presente en el vacío debido a que es rápidamente absorbida por el aire.	-

Kramer, Wunderlich, y Muranyi (2015); Ramos-Villarreal, Martín-Belloso, y Soliva-Fortuny (2011, 2015).

2. Mecanismo de inactivación microbiana de las tecnologías emergentes con luz UV

2.1. Luz ultravioleta a baja presión (UV-BP)

La luz ultravioleta emitida por lámparas de destellos de gas inerte es una fuente germicida monocromática que convierte la potencia eléctrica en radiación de alta potencia a partir de lámparas de mercurio de presión baja (LPB) o lámparas de mercurio de presión media (LMM) (Keklik y Krishnamurthy, 2012; Koutchma, 2010, 2019b).

Las lámparas de mercurio de baja presión son el único tipo de lámpara aprobado para su uso en la industria alimentaria por la FDA de EE. UU.; su funcionamiento se logra mediante el ingreso de energía a partir de un voltaje aplicado entre dos electrodos, lo que produce calor para vaporizar e ionizar el mercurio líquido dentro de un tubo de cuarzo. Posteriormente, el vapor de mercurio ionizado emite dos bandas en el rango de UV-C de 253.7 y 184 nm, donde únicamente la banda de luz de 253.7 nm logra irradiar a la muestra tratada, puesto que la banda de 184 nm es absorbida por el tubo de cuarzo y por la atmósfera (Souza y Koutchma, 2020).

Es por ello que este tipo de tratamiento ocupa únicamente como efecto germicida la región de onda corta (UV-C) en la longitud de 253.7 nm, la cual es absorbida por los ácidos nucleicos de los microorganismos. Los fotones UV-C absorbidos por las ba-

ses nitrogenadas del ADN microbiano desplazan de forma física a los electrones, lo cual rompe los enlaces conjugados, dando lugar a la formación de fotoproductos de reticulación covalente, como dímeros de pirimidina, que son enlaces entre pares adyacentes de pirimidina, timina y citosina en el ADN. Los enlaces formados provocan que el ADN no pueda descomprimirse para llevar a cabo la replicación, lo cual inhibe la reproducción celular y causa la muerte de los microorganismos (figura 2a) (Cassar *et al.*, 2020). Sin embargo, en algunos casos el daño producido por la luz UV puede repararse mediante los mecanismos de reparación del ADN o fotorreactivación (Bolton y Cotton, 2008; Cassar *et al.*, 2020).

La eficiencia del equipo depende de la potencia total de entrada o energía total (W), que se encuentra en función de la relación de la potencia media de salida y la entrada de voltaje total a la lámpara, además de la irradiancia o la cantidad de flujo incidente en un área específica expresada en mW/cm² y la irradiación a una distancia determinada (Koutchma, 2010; Keklik y Krishnamurthy, 2012; Gautam *et al.*, 2017; Antonio-Gutiérrez *et al.*, 2017; Dhahir *et al.*, 2020; Koutchma *et al.*, 2021). Adicionalmente, la eficiencia del tratamiento por UV en sistemas de operación continua también depende de la vida útil de la lámpara, la cual se encuentra en función del número total de horas de trabajo, con un máximo de 18,000 horas en funcionamiento continuo (Gómez-López *et al.*, 2012; Koutchma, 2010; Singh *et al.*, 2020; Koutchma *et al.*, 2021).

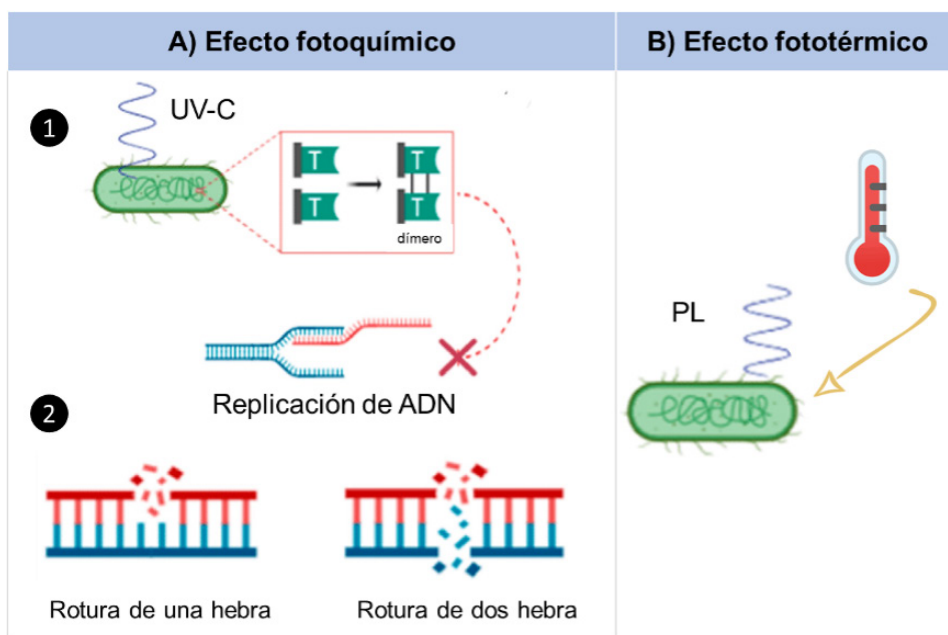


Figura 2.

Mecanismo de inactivación fotoquímico (a) y fototérmico (b) del ADN. Adaptada de Santamera *et al.* (2020).

2.2. Diodos emisores de luz ultravioleta (UV-LEDs)

Los diodos emisores de luz ultravioleta son un tipo de material semiconductor capaz de producir luz mediante electroluminiscencia. Los LEDs cuentan con dos uniones, la de tipo *n*, formado por un material rico en electrones, y la de tipo *p* (o agujeros), que son pobres en electrones. Cuando la corriente pasa a través del diodo, los electrones del material de tipo *n* pueden combinarse con los electrones del material de tipo *p*, lo cual provoca la excitación de los electrones y causa la liberación de energía como fotones (Koutchma *et al.*, 2019; Popovi y Koutchma, 2020). La longitud de onda de los fotones dependerá de la cantidad de energía requerida para promover un electrón desde la banda de valencia a la banda de conducción del material semiconductor (Hinds *et al.*, 2019; Kebbi *et al.*, 2020). Por otra parte, el mecanismo de inactivación microbiana de los UV-LEDs es el mismo que el de las lámparas de UV-BP a base de mercurio (figura 2a). La diferencia radica en el tipo de materiales semiconductores utilizados para realizar la inactivación, los cuales, dependiendo de sus propiedades, emitirán variaciones de longitudes de onda, desde 210 hasta 400 nm (UV-C a UV-A) (Kolbe *et al.*, 2011; Song *et al.*, 2016, 2019; Cassar *et al.*, 2020). Generalmente se utilizan aleaciones de nitruro III, in-

cluido el nitruro de galio (GaN) con longitudes de onda de 200 a 400 nm, el nitruro de aluminio (AlN) que cuenta con una longitud de onda de 210 nm y el nitruro de aluminio y galio (AlGaIn) que es una combinación entre AlN y GaN, el cual logra alcanzar longitudes de onda de 210 a 365 nm (Hinds *et al.*, 2019; Koutchma *et al.*, 2019; Cassar *et al.*, 2020).

A su vez, los equipos de luz UV-LEDs están compuestos por un circuito integrado (chips) de UV-LEDs que pueden ser empaquetados en múltiples formas, ya sea por chips únicos, que tienen un arreglo en conjunto con una misma longitud de onda, o en matriz de chips múltiples, los cuales pueden variar la longitud de onda del conjunto de chips. Ambos arreglos están formados por estructuras compactas, fácilmente comerciales, accesibles, pequeñas y flexibles, que otorgan una vida útil de alrededor de 100,000 horas de funcionamiento continuo (Koutchma *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2019). El arreglo de los chips y la longitud de onda seleccionados dependerán de cada producto a tratar y contribuirán al efecto germicida (Li *et al.*, 2019).

Entre los factores que afectan el rendimiento de inactivación en los tratamientos por UV-LEDs se incluye la densidad bacteriana, el pH, el tiempo de exposición a los rayos UV y la

longitud de onda única o la longitud de onda de acoplamiento de los chips LEDs (Chevremont, Farnet da Silva, Sergent, Coulomb, y Boudenne, 2019). Además, es importante considerar que la luz UV de los UV-LEDs penetra pocos milímetros la superficie del producto a tratar, por lo que el efecto de incidencia de la luz dependerá de las propiedades ópticas del alimento (Baykuş *et al.*, 2021; Koutchma *et al.*, 2021).

2.3. Pulsos de luz

Los pulsos de luz (PL) son una técnica que amplifica el mecanismo germicida producido por la luz UV mediante el uso de pulsos de corta duración y de amplio espectro electromagnético; comprende de 200 a 1100 nm (Gómez-López *et al.*, 2007). Los pulsos se generan cuando se aplica alto voltaje a un gas inerte, generalmente xenón, a partir de dos electrodos colocados en una lámpara de destellos, lo cual convierte la energía eléctrica en energía radiante pulsada (Mohamed y Eissa, 2012; Abida *et al.*, 2014; Demirci *et al.*, 2020). Este arreglo permite la producción de pulsos de luz, a partir de la magnificación de la energía pulsada en el orden de megavatios, que se almacena como electricidad en un capacitor durante algunos segundos y se libera de forma rápida, en una fracción de millonésima o milésima de segundo, lo cual provoca la excitación de las moléculas de gas dentro de la lámpara de destellos, dando como resultado pulsos de luz de alta intensidad (Cassar *et al.*, 2020; Dong *et al.*, 2020). La electricidad descargada en la lámpara de xenón produce picos de potencia elevados con altas repeticiones en el orden de 0.1 Hz, lo cual provoca que la intensidad de los PL sea de aproximadamente 20,000 veces la de la luz ultravioleta (Takeshita *et al.*, 2003; Gómez-López *et al.*, 2007; Vollmer *et al.*, 2020).

El mecanismo de inactivación se logra a partir del efecto fotoquímico y fototérmico, gracias al amplio espectro ocupado por este tratamiento, que abarca tres regiones del umbral electromagnético. La región ultravioleta (UV) con una longitud de onda de 200 a 400 nm, correspondiente al 25 % de luz emitida por los PL; la región visible (VIS) con un rango de 400 a 700 nm, que corresponde al 45 % de los PL; y la región de infrarrojo (IR) con una longitud de 700 a 1100 nm y un 30 % de la luz emitida por PL (Elmnasser *et al.*, 2007; Palgan *et al.*, 2011a; Shriver *et al.*, 2011). Ello, combinado con la corta duración de los pulsos y la frecuen-

cia emitida por la lámpara de destellos, contribuye al mecanismo de inactivación microbiana (Dunn, 1996; Takeshita *et al.*, 2003; Hinds *et al.*, 2019).

El efecto fotoquímico consiste en la dimerización de bases pirimidínicas en el ADN a causa de la irradiación UV-C, lo cual impide la replicación y, por lo tanto, la división celular de los microorganismos (figura 2a) (Roohinejad, Koubaa, *et al.*, 2018; Roohinejad, Parniakov, *et al.*, 2018). A su vez, el efecto fototérmico se debe a que a fluencias superiores a 0.5 J/cm² se logra la ruptura de la pared celular de los microorganismos por sobrecalentamiento temporal, debido a la absorción de la luz ultravioleta proveniente de la lámpara de destellos (figura 2b) (Roohinejad, Koubaa, *et al.*, 2018; Wekhof *et al.*, 2001), lo que provoca el colapso estructural de la célula y con ello la evacuación del contenido celular fuera de la membrana celular (Abida *et al.*, 2014; Bhavya y Hebbar, 2017; Mandal *et al.*, 2020).

Al igual que los tratamientos por UV-BP y UV-LEDs, la efectividad del tratamiento depende de la sensibilidad del tipo de microorganismos, siendo mayor para las bacterias vegetativas, seguido por las levaduras, esporas y finalmente los virus, los cuales presentan mayor resistencia a la inactivación (Anderson *et al.*, 2000; Pommerville, 2004; Levy *et al.*, 2012; Rowan *et al.*, 1999).

3. Efectos en las características de calidad de los alimentos líquidos tratados mediante tecnologías con rayos UV

El uso de tecnologías que aplican radiación UV como efecto germicida ha sido evaluado con la finalidad de contrarrestar cambios de calidad negativos en los alimentos. Entre las principales preocupaciones de los consumidores se encuentra la formación de subproductos tóxicos durante el procesamiento de alimentos, como el furano; esta es una inquietud en cualquier tecnología de conservación de alimentos, en vista de su capacidad como producto cancerígeno inducido por el procesamiento térmico. Dicho efecto se observa principalmente en alimentos con alto contenido de azúcares reductores y proteína, como la leche o jugos, pues pueden llevar a cabo la reacción de Maillard, lo que promueve la producción de compuestos furanos, cambios de color y reduce el valor nutricional de los alimentos (Koutchma, 2010; Hartyáni *et al.*, 2011; Putnik *et al.*, 2020).

Sin embargo, se ha observado que el tratamiento por PL no tiene un efecto significativo en el índice de oscurecimiento enzimático (Caminiti *et al.*, 2011; Mandal *et al.*, 2020; Muñoz, Caminiti, *et al.*, 2012; Palgan *et al.*, 2011b) ni en la composición de aminoácidos en productos lácteos (Elmnasser *et al.*, 2008), aunque aún se requieren mayores investigaciones. De igual manera, los alimentos con alto contenido de compuestos oxidantes tratados a partir de irradiación PL presentan una mayor reducción de la actividad enzimática tanto para polifenol oxidasa como de peroxidasa, en contraste con los alimentos pasteurizados mediante tratamientos térmicos (Manzocco *et al.*, 2013; Vollmer *et al.*, 2020). Sin embargo, se ha reportado que para minimizar este efecto es importante tomar en cuenta la distancia óptima entre la lámpara y la muestra, con el propósito de que este proceso no sea contraproducente ni se produzcan olores y/o sabores desagradables en el producto tratado por PL (Cassar *et al.*, 2020; Elmnasser *et al.*, 2008). Además, se han determinado menores pérdidas de la capacidad antioxidante, de 6 a 14 % (Palgan *et al.*, 2011b; Barba y Grimi, 2015; Vollmer *et al.*, 2020) al igual que en la concentración de ácido ascórbico, no mayor al 30 %, en los alimentos tratados mediante PL en comparación con aquellos pasteurizados mediante tratamientos térmicos, los cuales alcanzan pérdidas de hasta un 27 % en la capacidad antioxidante y del 60 % para vitamina C (Vollmer *et al.*, 2020).

Referente a los tratamientos mediante UV-BP, el efecto fotoquímico en los alimentos depende de la absorción de fotones y la cantidad de energía que se transmite a la superficie del producto. Estos equipos operan a una longitud de onda de 253.7 nm, rango en el cual los fotones contienen 112.8 kcal/fotón de energía radiante, que tiene la energía necesaria para interrumpir los puentes de hidrógeno, enlaces carbono-carbono, carbono-hidrógeno, carbono-nitrógeno, enlaces dihidrógeno y enlaces disulfuro (Juarez-Enriquez *et al.*, 2016; Koutchma, 2019a, 2019c; Souza *et al.*, 2019). Por lo tanto, la sensibilidad que presenta el producto a la radiación UV dependerá de la estructura química de cada alimento y estará también correlacionada con los nutrientes que presentarán mayor sensibilidad a la luz UV (Cassar *et al.*, 2020). Entre los nutrientes con mayor susceptibilidad se encuentran los compuestos termosensibles como la vitamina A, los carotenos, la cianocobalamina (vitamina B₁₂), la vitamina D, el ácido fólico, la vitamina K, la riboflavina (vitamina B₂), los tocoferoles (vita-

mina E), el triptófano y los ácidos grasos insaturados, al igual que algunos pigmentos naturales (Pirozzi *et al.*, 2020). Se ha reportado que la sensibilidad al uso de luz UV en estos compuestos se debe a altas dosis de energía emitidas al producto, tiempos prolongados de tratamiento y la relación existente entre la distancia del equipo y la dosis de energía suministrada a la muestra, lo cual provoca un efecto térmico que puede generar un incremento en la temperatura del medio, superando las temperaturas óptimas de tratamiento, y por lo tanto una degradación parcial o total de los compuestos termosensibles (Koutchma, 2008; Delgado *et al.*, 2012; Gómez-López *et al.*, 2012; Dhar y Chakraborty, 2020; Vollmer *et al.*, 2020).

A pesar de la sensibilidad de algunos nutrientes, se ha observado que los tratamientos mediante UV-BP pueden mejorar varias propiedades nutraceuticas en la fruta (Koutchma, 2019b; Cassar *et al.*, 2020), entre ellas, aumenta la cantidad de antioxidantes en frutas o verduras previamente cortadas, como uvas, peras, manzanas, arándanos, mangos, naranjas, toronjas y zanahorias (Du *et al.*, 2012; Cassar *et al.*, 2020); este efecto se debe a la activación de la síntesis de algunos aminoácidos, como la fenilalanina en uva y zanahoria, la cual es inducida por el corte de los productos. Ello, al combinarlo con una fuente de estrés abiótico, como la radiación UV, puede potencializar sinérgicamente la acumulación de compuestos fenólicos solubles y con ello incrementar la capacidad antioxidante de los productos. En este sentido, aún se requiere una investigación más exhaustiva respecto al rango de luz UV que contribuye en mayor medida a este incremento, así como determinar si dicho efecto es también observado en productos líquidos (Du *et al.*, 2014; Mäkilä *et al.*, 2016; Surjadinata *et al.*, 2017; Cassar *et al.*, 2020). También se ha observado que el tratamiento mediante luz UV previo a la extracción de jugos en frutas produce excelentes resultados en el contenido fitoquímico de los mismos (González-Barrio *et al.*, 2009; Juarez-Enriquez *et al.*, 2016; Vollmer *et al.*, 2020). Del mismo modo, se ha demostrado que los tratamientos con irradiación UV no afectan los parámetros de color en jugos y néctares tratados con una fluencia entre 30 y 2106 mJ/cm² (Gómez-López *et al.*, 2012; Akgün y Ünlütürk, 2017; Vipul *et al.*, 2018; Baykuş *et al.*, 2021); incluso se han observado mejoras en el color de jugos de manzana, melocotón y limón previamente tratados térmica-

mente para generar melanoidinas, por la reacción de fotólisis de estos compuestos poliméricos (Ibarz *et al.*, 2005). Adicionalmente, se ha determinado que los métodos que utilizan UV como fuente de irradiación no alteran el pH y los grados Brix de los productos tratados, ni las propiedades físicas de los alimentos líquidos, siempre y cuando no exista un efecto sinérgico en el aumento de la temperatura (Koutchma, 2008, 2019c; Palgan *et al.*, 2011b; Muñoz *et al.*, 2012; Ferrario y Guerrero, 2016; Akgün y Ünlütürk, 2017; Pierscianowski *et al.*, 2021). Sin embargo, en algunas ocasiones los tratamientos mediante UV pueden alterar las características sensoriales de ciertos productos, como es el caso de la leche de cabra, donde Matak *et al.* (2007) reportaron un aroma a estiércol, fétido y a corral en el producto tratado con una dosis mayor al 15.8 mJ/cm². Por otro lado, Guevara *et al.* (2012) notificaron cambios sensoriales detectables cuando los jugos de guayaba y maracuyá recibían un tratamiento con 3640 mJ/cm².

Adicionalmente, gracias a la baja emisión de calor que presentan los UV-LEDs, esta tecnología ha podido reducir los cambios asociados al calentamiento en la calidad de los alimentos, lo cual logra retrasar la senescencia y mejorar el contenido fitoquímico y nutricional (Nyangaresi *et al.*, 2018; Chevremont, Marie, *et al.*, 2019; Souza y Koutchma, 2020). A pesar de que aún es reciente el estudio de alimentos líquidos tratados mediante UV-LEDs, se ha observado que, al igual que los PL, este tratamiento es capaz de

reducir el oscurecimiento enzimático, aunque todavía es necesario investigar más sobre su efecto durante el procesamiento por operación continua (Akgün y Ünlütürk, 2017; Lante *et al.*, 2016).

4. Diseño y operación de equipos para su implementación en sistemas de operación continua

4.1. Luz ultravioleta a baja presión (UV-BP)

A la fecha se han desarrollado y validado diferentes equipos de UV-BP en sistema de flujo continuo para una gran variedad de bebidas, desde leche, proteína de suero, sidras, jugos y néctares (Koutchma, 2010; Gómez-López *et al.*, 2012; Hu *et al.*, 2018; Ahmed *et al.*, 2019; Dhahir *et al.*, 2020; Gouma *et al.*, 2020; Meléndez-Pizarro *et al.*, 2020). De igual manera, se han propuesto diferentes diseños de equipos para el procesamiento por operación continua, los cuales al optimizar los parámetros de operación han logrado una mayor efectividad en el tratamiento de fluidos alimenticios. Entre los diseños que han logrado incrementar el área de contacto entre la fuente de irradiación y la muestra se encuentran los equipos de tubo concéntrico (figura 3a) (Forney *et al.*, 2008; Ye *et al.*, 2007), el reactor anular de capa fina (figura 3b) (Ye *et al.*, 2007) y los equipos con tubo en espiral (figura 3c) (Mansor *et al.*, 2014).

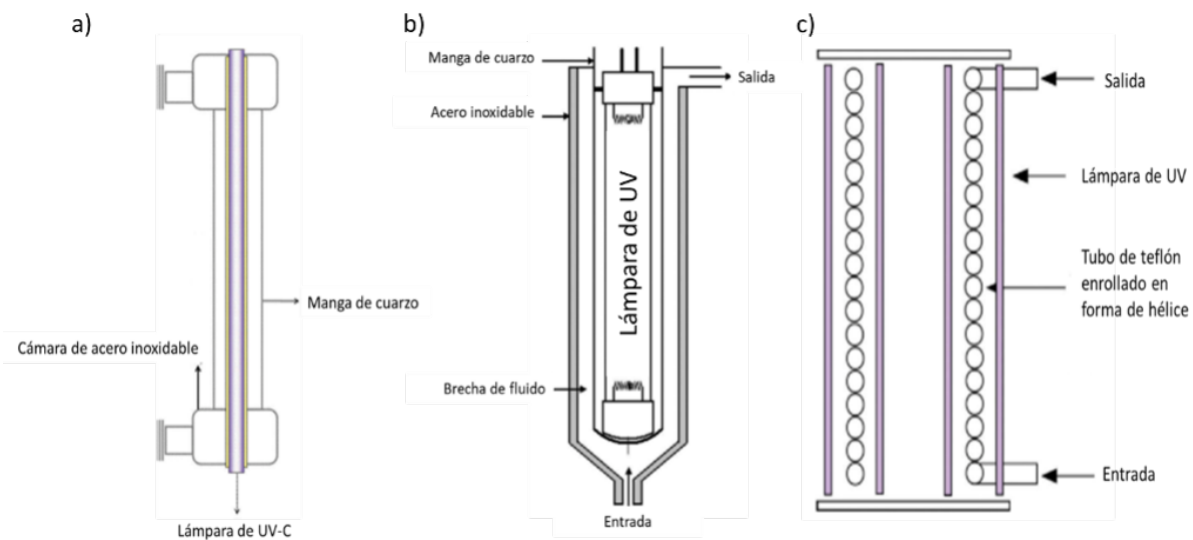


Figura 3.

Esquema de equipos por UV-BP de tubo concéntrico (a), de película anular (b) y con tubo en espiral (c). Adaptada de Koutchma (2019b).

Durante la implementación de nuevos diseños de equipos, para cualquier conformación de UV-BP en el tratamiento de alimentos líquidos en sistema de operación en continuo, se debe considerar el tiempo de residencia del fluido que es irradiado mediante la luz UV, al igual que la distribución adecuada del fluido en función a la geometría del equipo; de igual manera, la dosis de energía o fluencia suministrada a la muestra (mW/cm^2) y el caudal del flujo (ml/min) determinan la efectividad de los tratamientos mediante UV-BP (Keklik y Krishnamurthy, 2012; Koutchma, 2019b, 2021; Souza *et al.*, 2019). En cambio, el campo de intensidad UV no uniforme, por la absorción de la radiación UV-C, varía dependiendo de las características ópticas del producto a tratar y determina el efecto de la inactivación en el fluido (Koutchma, 2008, 2019c).

Tomando en cuenta estas consideraciones, se observa que dependiendo del diseño del tubo de cuarzo por donde fluye la muestra, así como del tipo de fluido y los parámetros de operación, se ve alterado el efecto de inactivación de los microorganismos (tabla II). Del mismo modo, se ha observado que en fluidos

con comportamiento no newtoniano, como muestras de leche entera (Choudhary *et al.*, 2011; Ye *et al.*, 2007), aún en equipos que ayudan a maximizar el área de tratamiento, el efecto germicida mediante UV-BP es menor que en productos con comportamiento newtoniano, como agua de coco y algunos jugos (Ye *et al.*, 2007; Mansor *et al.*, 2014; Bhullar *et al.*, 2017). A su vez, Antonio-Gutiérrez *et al.* (2019) observaron que la recirculación continua del líquido a tratar y la distancia recorrida por el alimento a través de la lámpara de UV-C son variables que pueden afectar la inactivación mediante UV-C, por lo que su disposición debe evaluarse en función del efecto deseado en el alimento a tratar.

Por lo tanto, uno de los parámetros que ayudan a determinar la efectividad de este tratamiento, que generalmente no se considera o evalúa, es la caracterización de las propiedades de transporte de la muestra previo al tratamiento, las cuales pueden ayudar a estimar el rendimiento del sistema de UV-BP y la dosis de energía requerida por cada producto (Gómez-López *et al.*, 2012; Gautam *et al.*, 2017; Jarvis *et al.*, 2019).

Tabla II. Estudios del efecto del procesamiento por luz ultravioleta a baja presión en operación continua en alimentos

Microorganismo	Producto	Tratamiento	Resultados	Referencia
<i>E. coli</i> W1485 y <i>Bacillus cereus</i>	Leche entera y descremada	Flujo: 25 a 100 ml/min; tiempo de residencia: 11.3 s; dosis de energía: 11.187 mJ/cm^2	7.8 log UFC/ml para <i>E. coli</i> en leche descremada 4.1 log UFC/ml para <i>E. coli</i> en leche entera 2.72 log UFC/ml	Choudhary, Watson, y Haddock (2011)
<i>Salmonella</i> , <i>Shigella spp.</i> , <i>Listeria monocytogenes</i> , <i>Staphylococcus spp.</i> , <i>Enterobacteriaceae</i> , bacterias ácido lácticas, <i>Pseudomonas</i> y bacterias aeróbicas totales	Leche	Flujo: 113 a 480 ml/min; tiempo de residencia: 1 a 20 s; dosis de energía: 5.3 a 20.5 mJ/cm^2	3-4 log UFC/ml a 20.5 mJ/cm^2	Lu, Li, y Liu (2011)
<i>Salmonella typhimurium</i>	Jugo de piña	Flujo: 7.8 a 121 ml/min; tiempo de residencia: 15.14 a 23.36 s; dosis de energía: 13.75 a 10.37 mJ/cm^2	5 log UFC/ml a 13.75 mJ/cm^2	Mansor, Shamsudin, Mohd, y Nizar (2014)
Virus (MS2, TIUV), <i>E. coli</i> ATCC 25922, <i>Salmonella typhimurium</i> ATCC 13311 y <i>Listeria monocytogenes</i> ATCC 19115	Agua de coco	Fluencia: 5 a 30 mJ/cm^2 ; flujo: 58.62 a 221 ml/min; dosis de energía: 0 a 400 mJ/cm^2	>5 log UFC/ml a 30 mJ/cm^2	Bhullar <i>et al.</i> (2017)

4.2. Diodos emisores de luz ultravioleta (UV-LEDs)

Como se describió anteriormente, los UV-LEDs son dispositivos que utilizan materiales para convertir la corriente continua (CC) en luz de longitud de onda de emisión variable mediante la unión de tipo *n* (electrón) y *p* (agujero). Dentro de las variables de diseño de los equipos se deben contemplar la longitud de onda electromagnética seleccionada dentro del espectro UV, la distancia entre la muestra y la fuente de luz y las condiciones ambientales dentro del equipo, que incluyen la temperatura del proceso y el plano claro/oscuro (Song *et al.*, 2016; Hinds *et al.*, 2019; Prasad *et al.*, 2019).

Generalmente los equipos de UV-LEDs en sistema por lote constan de un circuito integrado que contiene la lámpara junto con el arreglo de los chips de UV-LEDs, ya sea en el arreglo de chips únicos o en chips múltiples, cada uno con manejo térmico, los cuales emite la luz UV previamente seleccionada (UV-A, UV-B o UV-C) desde la fuente de poder hacia la muestra colocada debajo de la lámpara de UV-LEDs (figura 4a). A la fecha se han desarrollado reactores de flujo continuo, principalmente para la desinfección de agua potable a escala piloto; entre ellos destaca el diseño de Kolbe *et al.* (2010), que combina el tratamiento por lote, a partir de la acumulación del producto líquido a tratar en el tanque de capacitación, junto con el tratamiento por flujo continuo. En tanto que Oguma *et al.* (2013) desarrollaron un equipo a partir de tres matrices rectangulares, cada una con diez UV-LEDs, donde los tres conjuntos se agrupaban para construir un prisma triangular, que se colocaba en un manguito de cuarzo y era sumergido en el centro del cilindro (figura 4b). De igual manera, Jarvis *et al.* (2019) diseñaron un arreglo en espiral para el tratamiento en continuo de agua potable, el cual compara la eficiencia de un reactor de UV-LEDs en espiral a escala piloto de 3.15 l contra un reactor de haz colimado UV-BP,

donde se observó que los UV-LEDs a gran escala son igualmente eficientes que los reactores de UV con lámpara mercurio convencionales, tanto en las condiciones de calidad de agua como en la corriente de accionamiento.

A pesar de que existen reportes del escalamiento de equipos de UV-LEDs en sistemas de operación continua, la mayoría de las aplicaciones hasta ahora evalúan el tratamiento de agua potable, donde se han reportado inactivaciones de hasta 7 log UFC/ml para *E. coli* (Chevremont *et al.*, 2019; Kim y Kang, 2021). Aunque hay algunos estudios en alimentos líquidos (tabla III) donde, al igual que en el tratamiento de agua, se observan resultados favorables para su aplicación en el área alimentaria, obteniendo reducciones de hasta 7.5 log UFC/ml en *E. coli* para jugos y bebidas preparadas a base de frutas a diferentes longitudes de onda (Popovi y Koutchma, 2020; Pierscianowski *et al.* 2021), aún es necesario ampliar la investigación en este tipo de tratamientos en el ámbito alimenticio.

Por su parte, la efectividad de la inactivación por UV-LEDs se determina mediante la fluencia promedio emitida al microorganismo objetivo, que puede establecerse por la tasa de fluencia (mW/cm^2) y la irradiancia (mW/cm^2). La tasa de fluencia se define como la potencia radiante total incidente desde todas las direcciones sobre una pequeña esfera dividida por el área de la sección transversal de dicha esfera. Mientras que la irradiancia está definida como la potencia radiante de todas las longitudes de onda, que inciden desde todas las direcciones hacia arriba en un pequeño elemento de superficie que contiene el punto en consideración, dividido por el área del elemento (Kheyrandish *et al.*, 2018; Hinds *et al.*, 2019). De igual manera, si la tasa de fluencia es constante en el tiempo, la fluencia (mJ/cm^2) se puede calcular como la tasa de fluencia multiplicada por el tiempo de exposición de la muestra (Kheyrandish *et al.*, 2018).

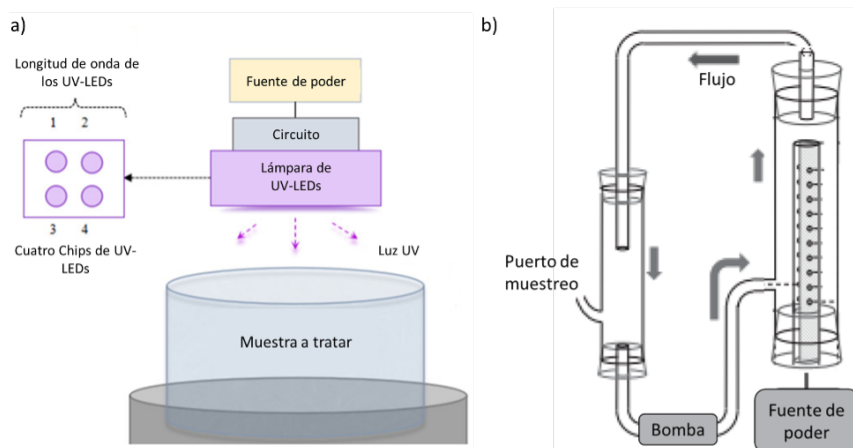


Figura 4.

Esquema de equipos UV-LEDs en sistema de operación por lote (a) y diseño de UV-LEDs en sistema de operación continua a partir del arreglo de diez chips UV-LEDs (b). Adaptada de Li *et al.* (2019) y Oguma *et al.* (2013).

Tabla III. Estudios del efecto del procesamiento por diodos emisores de luz ultravioleta en operación continua en alimentos

Microorganismo	Producto	Tratamiento	Resultados	Referencia
<i>E. coli</i>	Agua	Longitud de onda: 405, 254/365, 280/365, 280/405 nm; tiempo de residencia: 30 s	7 log UFC/ml a 254/365, 280/365, 280/405 nm	Chevremont, Farnet da Silva, Sergent, <i>et al.</i> (2019)
<i>E. coli</i> P36	Solución salina Jugo verde Jugo de remolacha Agua de coco Limonada azul Limonada rosa	Longitud de onda: 266, 276 y 281 nm; flujo: 8 y 16 ml/s; fluencia: 5 a 30 mJ/cm ² ; tiempo de residencia: 0.19 y 0.38 s	7.5 log UFC/ml en limonada azul a 15 mJ/cm ²	Popovi y Koutchma (2020)
<i>E. coli</i> P36	Jugo de kale	Longitud de onda: 253.7 nm; flujo: 2.32 ml/s; fluencia: 0 a 150 mJ/cm ² ; tiempo de residencia: 30.2 s	5.8 log UFC/ml a 150 mJ/cm ²	Pierscianowski <i>et al.</i> (2021)
<i>E. coli</i> O157:H7	Agua	Longitud de onda: 280 nm; flujo: 33.33 ml/s; dosis: 0 a 1406.2 mJ/cm ² ; tiempo de residencia: 0.89s	7 log UFC/ml a 1406.2 mJ/cm ²	Kim y Kang (2021)

4.3. Pulsos de luz

Los equipos de PL operados mediante flujo continuo (figuras 5a y 5b) están diseñados para procesar productos líquidos a partir del bombeo del sustrato por la cámara de tratamiento a través de un tubo de cuarzo, el cual permite la incidencia de destellos de luz mediante la lámpara de xenón (Popovi y Koutchma, 2020). La efectividad de los PL para la inactivación de microorganismos en alimentos depende de factores de procesamiento y diseño que son críticos para garantizar el tratamiento, en razón de que pueden llegar a afectar la homogeneidad del proceso y el nivel de energía aplicada a la muestra (Koutchma, 2008; Gómez-López *et al.*, 2012; Cassar *et al.*, 2020; Pirozzi *et al.*, 2020).

Los parámetros de procesamiento afectan considerablemente la inactivación de microorganismos; entre ellos, el factor más importante que determina la eficiencia es la fluencia total o la cantidad total de fotones incidentes en la muestra, por lo que la optimización del tratamiento por PL se obtiene mediante la selección adecuada de los parámetros que afectan la fluencia total. Los factores elementales a considerar son el volumen del tubo de cuarzo, el caudal del alimento líquido que pasa a través del tubo de cuarzo durante el tratamiento, la distancia entre la muestra y la lámpara, el tiempo de exposición, además del

número, la duración y la frecuencia de los pulsos impartidos por el equipo (Pirozzi *et al.*, 2020). Optimizar dichos parámetros de operación permite que la fluencia total aumente y el efecto germicida mejore. Del mismo modo, es necesario realizar mediciones en cuanto a la dosis de energía en la superficie o dentro de la muestra tratada por PL, ya que la energía en el producto es diferente a la energía entregada por la fuente de luz, debido a las pérdidas de radiación que existen durante la trayectoria de los pulsos de luz a causa de fenómenos de absorción y dispersión de la luz (Koutchma, 2009; Gómez-López *et al.*, 2012; Pirozzi *et al.*, 2020).

Los parámetros por considerar en el diseño de equipos de PL son la geometría y la configuración de la cámara de tratamiento, el número de lámparas y el deflector, los cuales influyen significativamente en la uniformidad del tratamiento y, por lo tanto, en la eficiencia del proceso y en la calidad del producto a tratar (Bhavva y Hebbar, 2017; Pirozzi *et al.*, 2020). También se debe tomar en cuenta el ajuste de la corriente eléctrica, ya que este parámetro ayuda a seleccionar los rangos de longitud de onda más adecuados emitidos por la lámpara, lo cual contribuye en el efecto germicida deseado y minimiza los cambios de las propiedades del sustrato (Orlowska *et al.*, 2013).

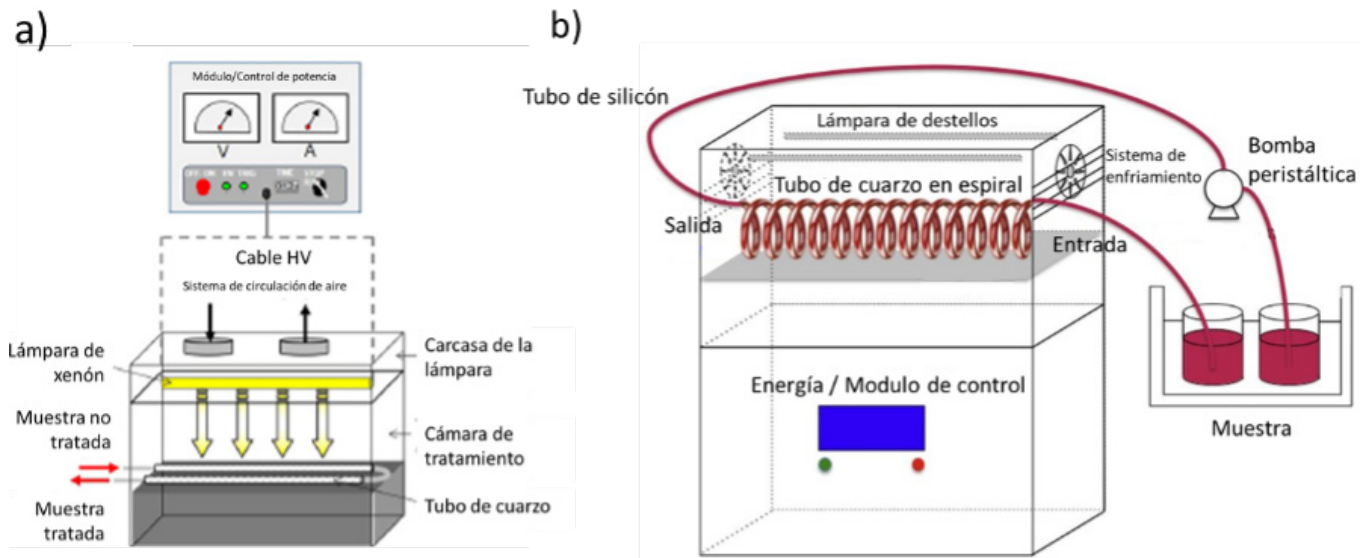


Figura 5.

Esquema de un sistema de PL en modo de operación continua para líquidos a partir de dos tubos de cuarzo (a) y con tubo de cuarzo en espiral (b). Adaptada de Pirozzi *et al.* (2020) y Xu *et al.* (2019).

Entre los equipos de PL convencionales se encuentran el estudiado por Krishnamurthy *et al.* (2007), donde el líquido es bombeado a través de un tubo de cuarzo a una velocidad entre 20 y 40 ml/min y la muestra es irradiada por la lámpara de xenón a diferentes números de pulsos, entre 1 y 3, con una fluencia de 1.27 J/cm², lo cual logra una alta reducción microbiana, 7.5 log UFC/ml para *S. aureus*, a una baja tasa de flujo. La optimización de este tipo de tratamiento se puede lograr a partir del incremento de tubos de cuarzo, como se observa en el estudio de Pataro *et al.* (2011), donde a partir de la recirculación del alimento tratado por la luz incidente se logró reducir hasta 5 y 3 log UFC/ml para *L. innocua* y *E. coli* en jugo de manzana y naranja, respectivamente (tabla IV). De igual manera, entre los sistemas de operación más innovadores y que han presentado resultados favorables se encuentra el proceso propuesto por Xu *et al.* (2019); un ejemplo del ensamble se muestra en la figura 5b, que comprende un sistema en espiral a través del cual fluye el alimento y es irradiado por dos lámparas de xenón desde la parte superior de la cámara de tratamiento, lo cual logra una inactivación para *E. coli* hasta de 4 log UFC/ml en

jugo de uva. Comparando dichos resultados con los obtenidos por Pataro *et al.* (2011) —a pesar de no ser el mismo alimento estudiado— y tomando en cuenta que el jugo de naranja y el jugo de uva son dos de los productos que presentan mayor resistencia a la inactivación de microorganismos por sus características ópticas, se puede observar que el tratamiento en espiral aumenta el área de tratamiento y, por lo tanto, existe un mayor efecto en la inactivación de microorganismos.

Finalmente, entre los efectos que se deben contrarrestar en este tipo de tratamientos (UV-BP, UV-LEDs y PL) se encuentra el aumento de la temperatura en la muestra expuesta a la radiación UV, lo cual puede llegar a comprometer la calidad de los alimentos, principalmente en tratamientos prolongados, además de que es posible obtener un efecto sinérgico entre la irradiación UV y el tratamiento térmico. Para ello, se sugiere incorporar sistemas de refrigeración y establecer una adecuada velocidad de flujo de la muestra y repetición de los pulsos o de la dosis de energía suministrada a la muestra, además de la adecuada selección de la distancia entre el alimento y la fuente de luz (Xu *et al.*, 2019; Putnik *et al.*, 2020; Vollmer *et al.*, 2020).

Tabla IV. Estudios del efecto del procesamiento por pulsos de luz en operación continua en alimentos

Microorganismo	Producto	Tratamiento	Resultados	Referencia
<i>S. aureus</i>	Leche	Fluencia: 1.27 J/cm ² /pulso; distancia: 5 a 11 cm; tasa de flujo: 0.33 a 0.66 ml/s	7.23 log UFC/ml a 8 cm y 0.33 ml/s	Krishnamurthy <i>et al.</i> (2007)
<i>Listeria innocua</i> 11288 y <i>Escherichia coli</i> DH5- α	Jugo de manzana y jugo de naranja	Dosis de energía: 1.8 a 5.5 J/cm ² ; distancia: 5.8 cm; tasa de flujo: 0.21 a 0.64 ml/s	Jugo de manzana: 5 log UFC/ml para <i>E. coli</i> a 5 J/cm ² , 5.5 log UFC/ml para <i>L. innocua</i> a 5.5 J/cm ² Jugo de naranja: 3 log UFC/ml para <i>E. coli</i> a 5 J/cm ² , 0.93 log UFC/ml para <i>L. innocua</i> a 5.5 J/cm ²	Pataro <i>et al.</i> (2011)
<i>L. innocua</i>	Agua	Fluencia total: 10 J/cm ² ; espesor del líquido: 2.15 a 6.23 mm; tasa de flujo: 16.66 a 83.33 ml/s	>5 log UFC/ml a 16.66 ml/s	Artíguez, Lasagabaster, y Marañón (2011)
<i>L. innocua</i>	Suero de leche, suero desnatado y diluciones de suero	Fluencia: 0.11 y 11 J/cm ² ; tasa de flujo: 83.33 ml/s	Suero y suero desnatado: 1.6 log UFC/ml a 11 J/cm ² Diluciones de suero: >5 log UFC/ml en diluciones a 11 J/cm ²	Artíguez y Martínez de Marañón (2015)
<i>E. coli</i>	Jugo de uva roja	Fluencia: 0.13, 0.40 y 0.66 J/cm ² /pulso; distancia: 10 cm; flujo en espiral: 0, 0.5 y 1 ml/s; pulsos: 10, 2, 40, 60, 80 y 100	4 log UFC/ml a 0.66 J/cm ² /pulso, 40 ml/min y 80 pulsos	Xu <i>et al.</i> (2019)

5. Combinación de tecnologías emergentes con radiación UV para el procesamiento de alimentos líquidos

La combinación de tratamientos no térmicos y/o térmicos en conjunto con los tratamientos por UV ha sido evaluada con la finalidad de aumentar el efecto germicida de estos procesos. Entre algunos de los estudios que han ayudado a incrementar la inactivación microbiana se encuentra el trabajo realizado por Muñoz *et al.* (2012) (tabla V) donde se evaluó la combinación de diferentes tratamientos no térmicos y antimicrobianos, tras lo cual se observó que una de las combinaciones más efectivas es mediante el uso de PL y campos eléctricos pulsados (PEF); así, el efecto germicida incrementó casi el doble respecto a lo obtenido únicamente mediante PL, alcanzando una inactivación para *E. coli*, de 3.6 log UFC/ml por el efecto de PL simple y de 6.6 log UFC/ml por la combinación de PL y PEF. A pesar de lo obtenido para *E. coli*, se observó que este efecto no fue el mismo para *Listeria innocua*, pues únicamente se logró una reducción no mayor a 2.8 log UFC/ml en la combinación por PL y PEF, probablemente porque las bacterias Gram positivas son menos sensibles a los tratamientos por UV.

También se ha analizado la combinación de PL y termosonicación (TS) en jugo de manzana para inactivar *E. coli*, donde se utilizó una tasa de flujo de 13.5 ml/min y una distancia entre la lámpara y la muestra de 1.9 cm para el tratamiento mediante PL, mientras que por TS se usó una tasa de flujo de 8 ml/min, con un tiempo de residencia de cinco minutos. La combinación de los tratamientos se realizó a partir de la colocación de forma seriada del equipo de TS seguido del equipo de PL. El diseño del equipo de PL utilizado por Muñoz *et al.* (2012) integraba dos tubos de cuarzo por donde se transportaba el fluido alimenticio, con el cual logró una reducción de 4.9 log UFC/ml para *E. coli*. En cambio, el tratamiento individual mediante TS solo logró inactivar 2.6 log UFC/ml de *E. coli*. Sin embargo, al evaluar el efecto combinado se obtuvo una reducción de 5.9 log UFC/ml para *E. coli*, lo cual sugiere que la combinación de tratamientos no térmicos con diferentes mecanismos tiene un efecto significativo en la inactivación de microorganismos.

Del mismo modo, el efecto combinado de tecnologías o tratamientos se ha estudiado en los procesos mediante UV-BP. La Cava y Sgroppo (2019) y Pagal y Gabriel (2020) estudiaron el efecto germicida mediante UV-C combinado con un tratamiento térmico leve o medio, de 53 a 63 °C. A pesar de la similitud en las investigaciones, se observó una reducción mayor a 6 log UFC/ml en el tratamiento realizado por Pagal y Gabriel (2020) para jugo de naranja, a diferencia de La Cava y Sgroppo (2019), los cuales solo lograron inactivar 4.99 log UFC/ml en jugo de uva; ello podría deberse al orden de aplicación del tratamiento por UV-C en la muestra. Debido a que Pagal y Gabriel (2020) realizaron primero un tratamiento térmico leve de 53°C, seguido del tratamiento por UV-C, de igual manera, la eficiencia en el efecto germicida en ambos estudios pudo ser causado por las características de la matriz de los alimentos tratados.

Por otra parte, Gómez-Sánchez *et al.* (2020) realizaron la combinación entre UV-C y microondas (MW), a partir de la implementación de sistemas en espiral, con la finalidad de evaluar el efecto sinérgico que existía entre ambas tecnologías, así como el efecto del arreglo durante la combinación de tratamientos en la inactivación de *Saccharomyces cerevisiae* y *E. coli*. Se observó que la combinación de ambos procesos aumenta la inactivación de los microorganismos, a causa de un efecto sinérgico. De igual manera, durante esta investigación se evidenció que el orden de aplicación de los distintos tratamientos, así como los patrones de flujo, eran significativos en el efecto germicida de la muestra, donde el arreglo UV-C seguido de MW con una tasa de flujo de 400 ml/min logra una mayor reducción en los microorganismos, alrededor de seis ciclos logarítmicos, en comparación con el arreglo inverso o de forma individual.

Finalmente, es importante resaltar que las investigaciones de los tratamientos por UV-LEDs en alimentos aún son limitadas y en su mayoría se han centrado en sistemas de operación por lote, sin la combinación con otros tratamientos térmicos y no térmicos. La incipiente aplicación de UV-LEDs abre la posibilidad para futuras investigaciones en sistema de operación continua y el efecto sinérgico al combinarse con otros tratamientos.

Tabla V. Combinación de tratamientos por irradiación ultravioleta con tratamientos térmicos o no térmicos

Microorganismo	Producto	Tratamiento	Resultados	Referencia
<i>E. coli</i> y <i>L. innocua</i>	Sistema buffer	Pulsos de luz (PL): dosis de energía: 3.3 J/cm ² ; distancia: 1.9 cm	PL: 3.6 log UFC/ml <i>E. coli</i> y 2.7 log UFC/ml <i>L. innocua</i> a 3.3 J/cm ²	Muñoz <i>et al.</i> (2012)
		Combinación PL+campos eléctricos pulsados (PEF): intensidad de campo eléctrico: 24 kV/cm; frecuencia: 18 Hz; ancho de pulso: 1 μs	PL+PEF: 6.6 log UFC/ml para <i>E. coli</i> y 6.6 log UFC/ml para <i>L. innocua</i>	
		Combinación PL+ultrasonido (US): entrada de energía: 100J/ml; tiempo de residencia: 126 s; potencia de salida: 500 W; temperatura: 40 °C	PL+US: 3.9 log UFC/ml para <i>E. coli</i>	
		Combinación PL+antimicrobiano: ácido láctico (AL), nisina (Ni) 2.5 mg/l	PL+AL: 4.0 log UFC/ml con ácido láctico en <i>E. coli</i>	
			PL+Ni: 3.2 log UFC/ml con nisina en <i>L. innocua</i>	
Combinación de tres tratamientos: PL+AL+(PEF o US)	PL+AL+PEF: 6.6 log UFC/ml para <i>E. coli</i> PL+AL+US: 5.5 log UFC/ml			
<i>E. coli</i>	Jugo de manzana	Pulsos de luz (PL): fluencia: 1.21 J/cm ² /pulso; distancia: 1.9 cm; tasa de flujo: 13.4 a 17 ml/min; dosis de energía: 4.03 y 5.10 J/cm ²	PL: 4.9 log UFC/ml a 5.1 J/cm ²	Muñoz <i>et al.</i> (2012b)
		Termosonificación (TS): tasa de flujo: 8 y 14 ml/min; tiempo de residencia: 171 y 300 s	TS: 2.6 log UFC/ml a 2531 J/ml en 5 min	
		Combinación de dos tratamientos: PL+TS	TS+PL o PL+TS: 5.9 log UFC/ml a 4.03 J/cm ² mediante PL y 5 min a 2531 J/ml mediante TS	
Mesófilos aerobios y levaduras de la fruta	Jugo de uva	UV-C: dosis de energía: 39.6 J/L; tasa de flujo: 4.26 ml/min tubo en espiral	UV-C: 4.10 y 4.08 log UFC/ml para aerobios totales y levaduras, respectivamente	La Cava y Sgroppo (2019)
		Tratamiento térmico (TT): 65 °C	TT: 2.28 y 2.24 log UFC/ml para aerobios totales y levaduras, respectivamente	
		Combinación de dos tratamientos: UV-C+TT	UV-C+TT: 4.99 a 5.14 log UFC/ml para aerobios totales y levaduras, respectivamente	
<i>Escherichia coli</i> O157:H7	Jugo de naranja	Combinación UV-C+TT (53 °C); dosis de energía: 1.14 mW/m ² ; tiempo de tratamiento: 0 a 5000 s	TT+UV-C: 6.35 log UFC/ml	Pagal y Gabriel (2020)

6. Ventajas y desventajas de las tecnologías emergentes que emplean radiación UV

Entre las ventajas que presenta el uso de PL (tabla VI) en comparación con otras tecnologías, se encuentra la eficiencia en la inactivación de una gran variedad de patógenos por su mecanismo de inactivación, que combina luz UV de amplio espectro junto con destellos de luz de alta potencia a partir de lámparas de xenón. Ello resulta en un tratamiento libre de mercurio, en contraste con el uso de luz UV a baja presión, y con mayor

eficiencia, en virtud de la transmisión instantánea de energía intensa suministrada al alimento tratado, traducido en tiempos cortos de procesamiento, entre segundos a milésimas de segundo, a pesar de que ambos equipos requieren de un previo calentamiento. Por otro lado, su combinación con otros tratamientos tanto térmicos como no térmicos o incluso con compuestos químicos consigue potencializar el efecto de los PL en la inactivación de microorganismos (Gómez-López *et al.*, 2007, 2012).

Tabla VI. Comparación entre fuentes de irradiación ultravioleta continua y pulsada

Fuente	Lámpara de UV de mercurio ^{1,2}	Lámpara LED ⁴	PL xenón ^{1,3}
Tipo de irradiación	UV-C	UV-C a UV-A	UV-C a UV-A, luz visible e irradiación
Rango de espectro (nm)	253.7	250-400	170-1000
Tipo de irradiación	Continuo	Continuo	Pulsado
Espectro	Monocromático	Monocromático	Policromático
Eficiencia (%)	30-33	>5	10
Intensidad	mW/área	mW/área	kW/área
Salida de potencia óptica	5-80 W	0.1-100 mW	0-380 kW
Tiempo de tratamiento	Minutos	Minutos a horas	Milisegundos
Tiempo de encendido	Minutos	Instantáneo	Minutos
Durabilidad	Frágil	Riguroso	Frágil
Vida útil de la fuente de irradiación	18,000 horas	50,000 horas	80,000 horas

Gómez-López *et al.* (2012)¹; Koutchma (2008², 2019³); Koutchma *et al.* (2019)⁴.

Sin embargo, a pesar de que los PL presentan bajos costos de operación, el costo de inversión inicial y la corta vida útil de las lámparas de xenón utilizada en los tratamientos por PL convierten a esta tecnología en un método que requiere de una

inversión constante para el reemplazo de las lámparas, lo cual ha limitado su implementación a escala industrial (Gómez-López *et al.*, 2012). Además, algunos autores han reportado sobrecalentamiento durante el tratamiento de las muestras, al igual

que durante algunos tratamientos por UV continua, lo cual se puede contrarrestar colocando sistemas de enfriamiento previo y/o posterior a los procesos; la implementación de estos dispositivos de enfriamiento incrementa también el costo de operación (Gómez-López *et al.*, 2012; Orłowska *et al.*, 2013; Koutchma, 2019a; Cassar *et al.*, 2020).

Por su parte, algunas ventajas de los equipos de UV-BP son el corto tiempo de tratamiento, el rango del espectro utilizado y la alta eficiencia en su aplicación, entre 30 y 33 % de efectividad, a diferencia de los tratamientos por UV-LEDs y PL (Bolton y Cotton, 2008; Ye y Forney, 2008). Por el contrario, una desventaja de este tratamiento es el uso de lámparas de mercurio como fuente luminiscente, pues además de ser peligrosas porque emplean un compuesto tóxico, tienen cubiertas de vidrio susceptibles a fracturas, una corta vida útil para su funcionamiento y un alto costo de reemplazo. De igual manera, se ha observado que el potencial de salida de las lámparas de mercurio disminuye significativamente a bajas temperaturas y, por lo tanto, requieren de tiempo de calentamiento previo a su funcionamiento para poder alcanzar la irradiación máxima requerida (Koutchma, 2008; Gómez-López *et al.*, 2012).

Referente a los UV-LEDs, estos ofrecen una gran ventaja por su capacidad para emitir una amplia variedad de longitudes de onda UV discreta a un bajo consumo de energía. Asimismo, las UV-LEDs tienen picos de emisión más amplios en contraste con las lámparas de UV-BP, lo cual ayuda a aumentar su capacidad germicida (Koutchma, 2019b). Del mismo modo, el bajo costo de requerimiento de energía y el tipo de materiales utilizados para su fabricación provoca que las lámparas de UV-LEDs presenten una mayor vida útil en comparación con los PL y UV-BP. Además, estos dispositivos pueden ser diseñados para producir luz UV-C continua a la longitud de onda germicida óptima contra un microorganismo específico, a diferencia de los equipos de UV-BP, que están limitados a una única emisión de luz de 253.7 nm (Nyangaresi *et al.*, 2018; Koutchma *et al.*, 2019; Cassar *et al.*, 2020). No obstante, aún es limitada su aplicación para el procesamiento de alimentos, principalmente en sistemas

de operación continua, y estos equipos solo presentan una eficiencia mayor al 5 %, menor en comparación con los PL y UV-BP (Song *et al.*, 2016).

De manera general, durante la implementación de las tres tecnologías discutidas se ha observado que la radiación UV-A no logra ser absorbida por el ADN, por lo cual este tipo de longitud de onda no tiene un efecto significativo en la inactivación microbiana. Sin embargo, se ha determinado que la longitud de onda electromagnética de 315 nm a 400 nm puede producir radicales hidroxilos que logran dañar las proteínas de las membranas bacterianas y con ello promover la inactivación de microorganismos, aunque en algunas ocasiones puede existir la fotorreactivación de las células microbianas. Aun cuando la luz UV-A puede causar la fotorreactivación, se ha encontrado que la mezcla de luz UV-A con UV-C puede lograr exitosamente la inactivación de microorganismos, gracias al efecto germicida de la luz UV-C y la capacidad de penetración de la luz UV-A en los líquidos que presentan mayor turbidez (Chevremont, Boudenne, Coulomb, y Farnet, 2013; Akgün y Ünlütürk, 2017; Kheyrandish *et al.*, 2018; Chevremont, Farnet da Silva, Coulomb, *et al.*, 2019), lo cual es una ventaja para los equipos que cuentan con un rango en el espectro UV-A, como los PL y UV-LEDs (Koutchma, 2019b).

Sin embargo, a causa del efecto de la refracción y transmisión de la luz que estas tecnologías requieren para su adecuado funcionamiento, la composición y la opacidad de los productos a tratar inciden en gran medida en la eficacia de los tratamientos; al respecto, diversos autores han señalado que el color y la turbidez de un líquido influyen en el coeficiente de absorción óptica del líquido (Gómez-López *et al.*, 2007, 2012; Koutchma, 2019b; Koutchma *et al.*, 2019). Por lo tanto, la capacidad de penetración de la luz UV, mediante UV-BP, PL y UV-LEDs, se ve reducida a medida que aumenta el coeficiente de absorción. Mientras que a medida que disminuye la capacidad de penetración, la tasa de inactivación también disminuirá, ya que el tratamiento no logra alcanzar la profundidad total del medio/alimento. Por ello, para maximizar la

eficiencia del procesamiento mediante UV es recomendable que los alimentos a tratar se expongan en capas delgadas y homogéneas frente a la fuente de irradiación UV (Song *et al.*, 2018; Koutchma *et al.*, 2019).

Finalmente, como se mencionó anteriormente, la inactivación de microorganismos depende de la distribución de la longitud de onda del pico de absorción, la cual varía entre cada microorganismo. Pero se ha observado que ciertos microorganismos presentan más de un pico de absorción de luz UV en diferentes longitudes de onda (Li *et al.*, 2019). Por lo tanto, el uso de equipos que operen a diferentes longitudes de onda aumenta la eficiencia del efecto germicida. A pesar de requerir mayores estudios respecto a este tema, es necesario implementar futuras investigaciones en el tratamiento de alimentos mediante equipos que utilicen diferentes longitudes de onda o la combinación de tratamientos no térmicos para la conservación de alimentos (Hinds *et al.*, 2019).

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Diversos estudios han demostrado que los tratamientos mediante UV-BP, UV-LEDs y PL tienen el potencial de reemplazar los métodos tradicionales de pasteurización, aunque su efectividad depende de las características de la matriz de la muestra a tratar y de los parámetros de operación de los equipos, tales como la dosis de energía, la tasa del flujo del fluido y la distancia entre la fuente de luz. Por ello, la optimización de los parámetros de operación es importante para incrementar el efecto germicida de los tratamientos por radiación UV. Por otra parte, se ha observado que la combinación entre tecnologías que aplican

radiación UV junto con tratamientos térmicos y/o no térmicos puede aumentar la eficiencia en la inactivación. De igual forma, se ha determinado que el orden de aplicación de los tratamientos combinados tiene un efecto significativo en la pasteurización, pues el efecto puede ser aditivo o sinérgico dependiendo del tipo de tecnología implementada y los microorganismos presentes.

A pesar de que los resultados obtenidos por diversos autores en la aplicación de tecnologías emergentes mediante radiación UV en alimentos líquidos han sido favorables, todavía existen áreas de oportunidad en torno a la configuración de nuevos equipos, arreglos para la combinación de tratamientos, modelación y escalamiento de los mismos. Tal como se mostró en esta revisión, la tecnología con un mayor grado de desarrollo e implementación es el tratamiento mediante UV-BP, pues su efecto para la pasteurización de alimentos únicamente está determinado por una longitud de onda fija de 253.7 nm; seguido por el tratamiento mediante PL, ya que esta tecnología tiene la ventaja de reducir el tiempo del tratamiento de pasteurización a causa de la aplicación de radiación UV de amplio espectro y destellos de luz; pero el estudio de tratamientos mediante UV-LEDs es todavía incipiente, lo cual abre un área de oportunidad para su investigación e implementación en el procesamiento de alimentos líquidos.

AGRADECIMIENTOS

C. Pihen Martínez 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 de sus estudios de posgrado.

REFERENCIAS

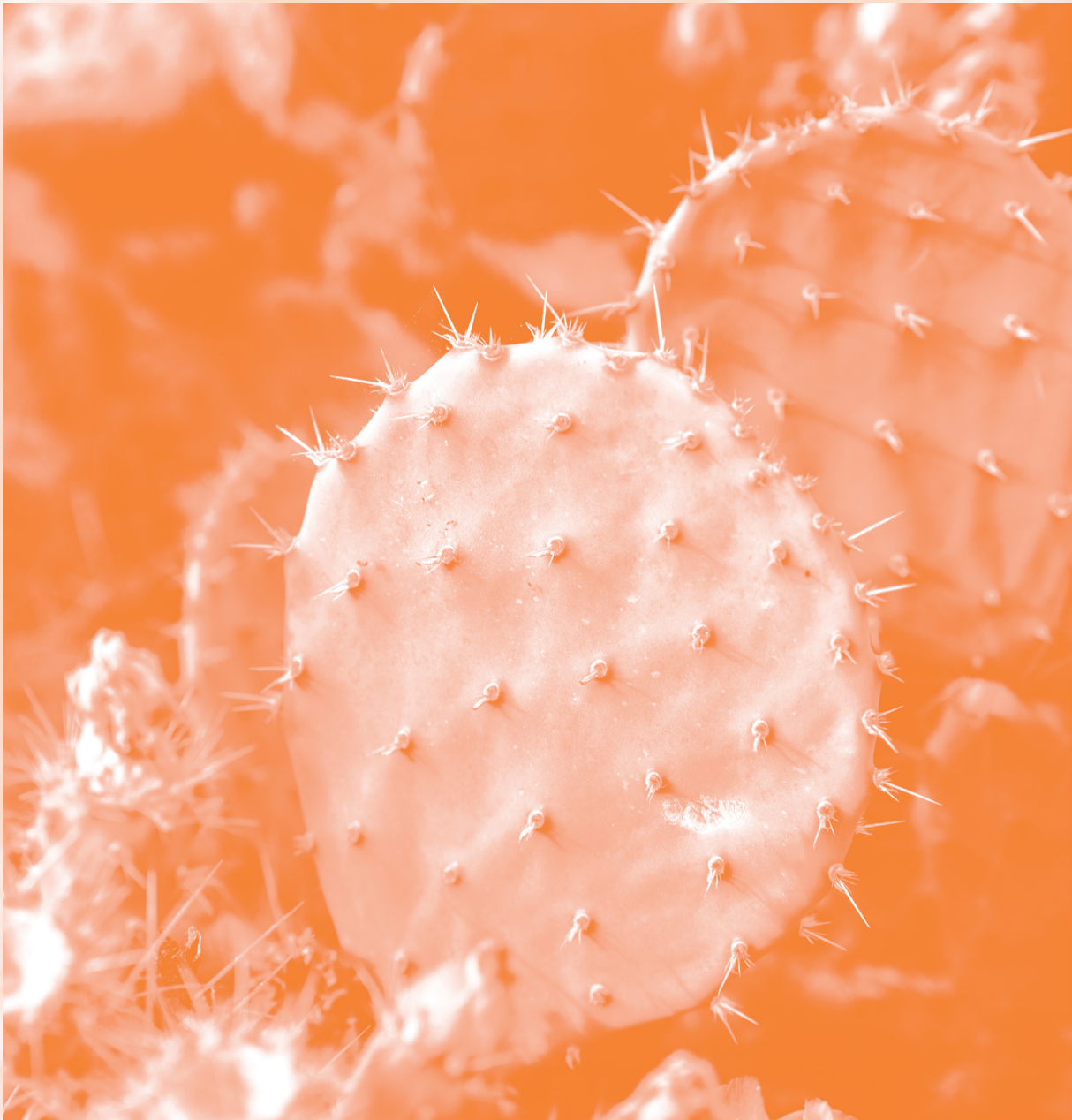
- Abida, J., Rayees, B. y Masoodi, F. A. (2014). Pulsed light technology: A novel method for food preservation. *International Food Research Journal*, 21(3), 839-848.
- Ahmed, J., Ismail, M. y Farid, M. (2019). Investigate the efficacy of UV pretreatment on thermal inactivation of *Bacillus subtilis* spores in different types of milk. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 52, 387-393. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.02.002>
- Akgün, M. P. y Ünlütürk, S. (2017). Effects of ultraviolet light emitting diodes (LEDs) on microbial and enzyme inactivation of apple juice. *International Journal of Food Microbiology*, 260, 65-74. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.08.007>
- Anderson, J. G., Rowan, N. J., MacGregor, S. J., Fouracre, R. A. y Parish, O. (2000). Inactivation of food-borne enteropathogenic bacteria and spoilage fungi using pulsed-light. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 28(1), 83-88. <https://doi.org/10.1109/27.842870>
- Antonio-Gutiérrez, O., López-Díaz, A., Palou, E., López-Malo, A. y Ramírez-Corona, N. (2019). Characterization and effectiveness of short-wave ultraviolet irradiation reactors operating in continuous recirculation mode to inactivate *Saccharomyces cerevisiae* in grape juice. *Journal of Food Engineering*, 241, 88-96. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.08.011>
- Antonio-Gutiérrez, O., López-Malo, A., Ramírez-Corona, N. y Palou, E. (2017). Enhancement of UVC-light treatment of tangerine and grapefruit juices through ultrasonic atomization. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 39, 7-12. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.10.019>
- Artíguez, Mari L., Lasagabaster, A. y Martínez, I. (2011). Factors affecting microbial inactivation by Pulsed Light in a continuous flow-through unit for liquid products treatment. *Italian Oral Surgery*, 1, 786-791. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.119>
- Artíguez, Mari L. y Martínez, I. (2015). Improved process for decontamination of whey by a continuous flow-through pulsed light system. *Food Control*, 47, 599-605. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.08.006>
- Barba, F. J. y Grimi, N. (2015). New approaches for the use of non-conventional cell disruption technologies to extract potential food additives and nutraceuticals from microalgae. *Food Eng Rev*, 45-62. <https://doi.org/10.1007/s12393-014-9095-6>
- Baykuş, G., Akgün, M. P. y Unluturk, S. (2021). Effects of ultraviolet-light emitting diodes (UV-LEDs) on microbial inactivation and quality attributes of mixed beverage made from blend of carrot, carob, ginger, grape and lemon juice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 67. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102572>
- Bhavya, M. L. y Umesh Hebbar, H. (2017). Pulsed light processing of foods for microbial safety. *Food Quality and Safety*, 1(3), 187-201. <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyx017>
- Bhullar, M. S., Patras, A., Kilanzo-nthenge, A., Pokharel, B., Yannam, S. K., Rakariyathamb, K., Pan, C., Xiao, H. y Sasges, M. (2017). Microbial inactivation and cytotoxicity evaluation of UV irradiated coconut water in a novel continuous flow spiral reactor. *Food Research International*. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.10.004>
- Bolton, J. R. y Cotton, C. A. (2008). Mechanism of UV disinfection. *The Ultraviolet Disinfection Handbook*, American W, 25-40.
- Caminiti, I. M., Noci, F., Muñoz, A., Whyte, P., Morgan, D. J., Cronin, D. A. y Lyng, J. G. (2011). Impact of selected combinations of non-thermal processing technologies on the quality of an apple and cranberry juice blend. *Food Chemistry*, 124(4), 1387-1392. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.07.096>
- Cassar, J. R., Ouyang, B., Krishnamurthy, K. y Demirci, A. (2020). *Food Safety Engineering*. Springer.
- Chaine, A., Levy, C., Lacour, B. y Riedel, C. (2012). Decontamination of sugar syrup by pulsed light. *Journal of Food Protection*, 75(5), 913-917. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-11-342>
- Chemat, F., Rombaut, N., Meullemiestre, A., Turk, M., Perino, S. y Abert-vian, M. (2017). Review of green food processing techniques. Preservation, transformation, and extraction. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 41, 357-377. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.04.016>
- Chevremont, A. C., Boudenne, J. L., Coulomb, B. y Farnet, A. M. (2013). Impact of watering with UV-LED-treated wastewater on microbial and physico-

- chemical parameters of soil. *Water Research*, 47(6), 1971-1982. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.01.006>
- Chevremont, A., Farnet da Silva, A. M., Sergent, M., Coulomb, B. y Boudenne, J. (2019). Multivariate optimization of fecal bioindicator inactivation by coupling UV-A and UV-C LEDs. *DES*, 285, 219-225. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.10.006>
- Chevremont, A., Farnet da Silva, M. A., Coulomb, B. y Boudenne, J. (2019). Effect of coupled UV-A and UV-C LEDs on both microbiological and chemical pollution of urban wastewaters. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.043>
- Choudhary, R., Watson, D. G. y Haddock, J. (2011). Performance of coiled tube ultraviolet reactors to inactivate *Escherichia coli* W1485 and *Bacillus cereus* endospores in raw cow milk and commercially processed skimmed cow milk. *Journal of Food Engineering*, 107(1), 14-20. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.06.009>
- Delgado, A., Kulisiewicz, L., Rauh, C. y Wierschem, A. (2012). Fluid dynamics in novel thermal and non-thermal processes. In *Novel Thermal And Non-Thermal Technologies For Fluid Foods*, 2. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381470-8.00002-5>
- Dhahir, N., Feugang, J., Witrick, K., Park, S., White, S. y Abughazaleh, A. (2020). The effect of different ultraviolet-c light doses on microbial reduction and the components of camel milk. *Food Science and Technology International*, 1-13. <https://doi.org/10.1177/1082013220935230>
- Dhar, R. y Chakraborty, S. (2020). Influence of voltage and distance on quality attributes of mixed fruit beverage during pulsed light treatment and kinetic modeling. *J Food Process Eng.*, 1-14. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13517>
- Dong, X., Wang, J. y Raghavan, V. (2020). Critical reviews and recent advances of novel non-thermal processing techniques on the modification of food allergens. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(2), 196-210. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1722942>
- Du, W., Avena-Bustillos, R. J., Breksa, A. P. y Mchugh, T. H. (2012). Effect of uv-B light and different cutting styles on antioxidant enhancement of commercial fresh-cut carrot products. *Food Chemistry*, 134(4), 1862-1869. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.03.097>
- Du, W., Avena-Bustillos, R. J., Iii, A. P. B. y Mchugh, T. H. (2014). UV-B light as a factor affecting total soluble phenolic contents of various whole and fresh-cut specialty crops. *Postharvest Biology and Technology*, 93, 72-82. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2014.02.004>
- Dunn, J. (1996). Pulsed light and pulsed electric field for foods and eggs. *Poultry Science*, 75(9), 1133-1136. <https://doi.org/10.3382/ps.0751133>
- Elmnasser, N., Dalgalarroondo, M., Orange, N., Bakhrouf, A., Haertlé, T., Federighi, M. y Chobert, J. M. (2008). Effect of pulsed-light treatment on milk proteins and lipids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(6), 1984-1991.
- Elmnasser, N., Ritz, M., Leroi, F., Orange, N., Bakhrouf, A. y Federighi, M. (2007). Bacterial inactivation using pulsed light. *Acta Alimentaria*, 36(3), 373-380. <https://doi.org/10.1556/AAlim.36.2007.3.9>
- Ferrario, M. y Guerrero, S. (2016). Effect of a continuous flow through pulsed light system combined with ultrasound on microbial survivability, color and sensory shelf life of apple juice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 34, 214-224. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.02.002>
- Forney, L. J., Ye, Z. y Koutchma, T. (2008). uv disinfection of *E. coli* between concentric cylinders: effects of the boundary layer and a wavy wall. *Ozone: Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association*, 37-41. <https://doi.org/10.1080/01919510802473872>
- Gabrić, D., Barba, F., Roohinejad, S., Gharibzadeh, S. M. T., Radojčin, M., Putnik, P. y Bursač-Kovačević, D. (2018). Pulsed electric fields as an alternative to thermal processing for preservation of nutritive and physicochemical properties of beverages: A review. *Journal of Food Process Engineering*, 41(1).
- Gautam, D., Umagiliyage, A. L., Dhital, R., Joshi, P., Watson, D. G., Fisher, D. J. y Choudhary, R. (2017). Nonthermal pasteurization of tender coconut water using a continuous flow coiled UV reactor. *LWT - Food Science and Technology*, 83, 127-131. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.05.008>
- Gómez-López, V. M., Koutchma, T. y Linden, K. (2012). Ultraviolet and Pulsed Light Processing of Fluid Foods. In *Novel Thermal And Non-Thermal Technologies For Fluid Foods*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381470-8.00008-6>
- Gómez-López, V. M., Ragaert, P., Debevere, J. y Devlieghere, F. (2007). Pulsed light for food decontamination: a review. *Trends in Food Science and Technology*, 18(9), 464-473. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2007.03.010>
- Gómez-Sánchez, D. L., Antonio-Gutiérrez, O., López-Díaz, A. S., Palou, E., López-Malo, A. y Ramirez-Corona, N. (2020). Performance of combined technologies for the inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* and *Escherichia coli* in pomegranate juice: The effects of a continuous-flow UV-Microwave system. *J Food Process Eng.*, 1-13. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13565>
- González-Barrio, R., Vidal-Guevara, M. L., Tomás-Barberán, F. A. y Espín, J. C. (2009). Preparation of a resveratrol-enriched grape juice based on ultraviolet c-treated berries. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 10(3), 374-382.
- Gouma, M., Álvarez, I., Condón, S. y Gayán, E. (2020). Pasteurization of carrot juice by combining uv-c and mild heat: Impact on shelf-life and quality compared to conventional thermal treatment. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 64. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102362>
- Guevara, M., Tapia, M. S. y Gómez-López, V. M. (2012). Microbial inactivation and quality of guava and passion fruit nectars treated by uv-c light. *Food and Bioprocess Technology*, 5(2), 803-807.
- Hartyáni, P., Dalmadi, I., Cserhalmi, Z., Kántor, D. B., Tóth-Markus, M. y Sasaki, Á. (2011). Physical-chemical and sensory properties of pulsed electric field and high hydrostatic pressure treated citrus juices. *Innovative*

- Food Science and Emerging Technologies*, 12(3), 255-260. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2011.04.008>
- Hinds, L., Donnell, C. P. O., Akhter, M. y Brijesh, K. (2019). Principles and mechanisms of ultra violet light emitting diode technology for food industry applications. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.04.006>
- Hu, G., Liu, H., Zhu, Y., Hernandez, M., Koutchma, T. y Shao, S. (2018). Suppression of the formation of furan by antioxidants during UV-C light treatment of sugar solutions and apple cider. *Food Chemistry*, 342-346.
- Ibarz, A., Pagán, J., Panadés, R. y Garza, S. (2005). Photochemical destruction of color compounds in fruit juices. *Journal of Food Engineering*, 69(2), 155-160.
- Jarvis, P., Autin, O., Goslan, E. H. y Hassard, F. (2019). Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LED) to full-scale drinking-water disinfection. *Water (Switzerland)*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/w11091894>
- Juarez-Enriquez, E., Salmerón, I. y Gutierrez-Mendez, N. (2016). Ultraviolet irradiation effect on apple juice bioactive, 2-9. <https://doi.org/10.3390/foods5010010>
- Kebbi, Y., Muhammad, A. I., Liu, D. y Ana, A. S. S. (2020). Recent advances on the application of UV-LED technology for microbial inactivation: Progress and mechanism. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 19, 3501-3527. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12645>
- Keklik, N. M. y Krishnamurthy, K. (2012). Microbial decontamination of food by ultraviolet (uv) and pulsed uv light. *Microbial decontamination in the food industry: Novel methods and applications*. <https://doi.org/10.1533/9780857095756.2.344>
- Kheyrandish, A., Mohseni, M. y Taghipour, F. (2018). Protocol for determining ultraviolet light emitting diode (UV-LED) fluence for microbial inactivation studies. *Environmental Science & Technology*, 52, 7380-7398. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05797>
- Kim, D. y Kang, D. (2021). Investigation of a new UVC LEDs array continuous type water disinfection system for inactivating *Escherichia coli* O157:H7 according to flow rate and electrical energy efficiency analysis. *Food Control*, 119. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107470>
- Kolbe, T., Lipsz, M., Ku, A., Weyers, M., Kneissl, M. y Jekel, M. (2011). Application of GaN-based ultraviolet-C light emitting diodes –UV LEDs– for water disinfection. *Water Research*, 45, 1481-1489. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.11.015>
- Koutchma, T. (2008). UV light for processing foods. *Ozone: Science and Engineering*, 30(1), 93-98. <https://doi.org/10.1080/01919510701816346>
- Koutchma, T. (2009). Advances in ultraviolet light technology for non-thermal processing of liquid foods. *Food Bioprocess Technol*, 138-155. <https://doi.org/10.1007/s11947-008-0178-3>
- Koutchma, T. (2010). Challenges of UV light processing of low UVT foods and beverages. *Laser Beam Shaping XI*, 77890H. <https://doi.org/10.1117/12.860259>
- Koutchma, T. (2019a). Global regulations on ultraviolet and pulsed light technology for food related applications. *Innovative Food Processing Technologies: A Comprehensive Review*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22945-4>
- Koutchma, T. (2019b). *Technology for food applications from farms to kitchens*. Academic P.
- Koutchma, T. (2019c). *Ultraviolet light in food technology*. CRC Press.
- Koutchma, T. (2021). Fluence concept, theoretical evaluation and practical validation in UVC preservation of opaque food liquids and beverages. *Innovative Food Processing Technologies: A Comprehensive Review*, 2. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22961-2>
- Koutchma, T., Bissonnette, S. y Popović, V. (2021). An update on research, development and implementation of UV and pulsed light technologies for nonthermal Preservation of milk and dairy products. *Innovative Food Processing Technologies*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100596-5.22680-2>
- Koutchma, T., Popović, V. y Green, A. (2019). Overview of ultraviolet (UV) LEDs technology for applications in food production. *Ultraviolet LED Technology for Food Applications: From Farms to Kitchens*, 1-23. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817794-5.00001-7>
- Kramer, B., Wunderlich, J. y Muranyi, P. (2015). Pulsed light decontamination of endive salad and mung bean sprouts and impact on color and respiration activity. *Journal of Food Protection*, 78(2), 340-348. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-14-262>
- Krishnamurthy, K., Demirci, A. y Irudayaraj, J. M. (2007). Inactivation of *Staphylococcus aureus* in milk using flow-through pulsed UV-Light treatment system. *Journal of Food Science*, 72(7), 233-239. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00438.x>
- La Cava, E. L. M. y Sgroppo, S. C. (2019). Combined effect of UV-C light and mild heat on microbial quality and antioxidant capacity of grapefruit juice by flow continuous reactor. *Food and Bioprocess Technology*.
- Lante, A., Tinello, F. y Nicoletto, M. (2016). UV-A light treatment for controlling enzymatic browning of fresh-cut fruits. *Innovative Food Sci Emerg Technol*, 34, 141-147. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.12.029>
- Levy, C., Aubert, X., Lacour, B. y Carlin, F. (2012). Relevant factors affecting microbial surface decontamination by pulsed light. *International Journal of Food Microbiology*, 152(3), 168-174. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2011.08.022>
- Li, X., Cai, M., Wang, L., Niu, F., Yang, D. y Zhang, G. (2019). Evaluation survey of microbial disinfection methods in UV-LED water treatment systems. *Science of the Total Environment*, 659, 1415-1427. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.344>

- Lu, G., Li, C. y Liu, P. (2011). UV inactivation of milk-related microorganisms with a novel electrodeless lamp apparatus. *Eur Food Res Technol*, 233, 79-87. <https://doi.org/10.1007/s00217-011-1498-5>
- Mäkilä, L., Laaksonen, O., Kallio, H. y Yang, B. (2016). Effect of processing technologies and storage conditions on stability of black currant juices with special focus on phenolic compounds and sensory properties. *Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.079>
- Mandal, R., Mohammadi, X., Wiktor, A., Singh, A. y Singh, A. P. (2020). Applications of pulsed light decontamination technology in food processing: An overview. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/app10103606>
- Mansor, A., Shamsudin, R., Mohd, N. y Nizar, M. (2014). Efficacy of ultraviolet radiation as non-thermal treatment for the inactivation of *Salmonella typhimurium* TISTR 292 in pineapple fruit juice. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2, 173-180. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2014.11.025>
- Manzocco, L., Panozzo, A. y Nicoli, M. C. (2013). Inactivation of polyphenoloxidase by pulsed light. *Journal of Food Science*, 78(8), 1183-1187. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12216>
- Masschelein, W. y Rice, R. (2002). Use of ultraviolet light for disinfection of drinking Water. *Ultraviolet Light in Water and Wastewater Sanitation*.
- Matak, K. E., Sumner, S. S., Duncan, S. E., Hovingh, E., Worobo, R. W., Hackney, C. R. y Pierson, M. D. (2007). Effects of ultraviolet irradiation on chemical and sensory properties of goat milk. *Journal of Dairy Science*, 90(7), 3178-3186. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-642>
- Meléndez-Pizarro, C. O., Calva-Quintana, A., Espinoza-Hicks, J. C., Sánchez-Madrigal, M. Á. y Quintero-Ramos, A. (2020). Continuous flow UV-C irradiation effects on the physicochemical properties of aloe vera gel and pitaya (*Stenocereus spp.*) blend. *Food*, 9, 1068.
- Minh, T., Nguyen, H., Suwan, P., Koottatep, T. y Beck, S. E. (2019). Application of a novel, continuous-feeding ultraviolet light emitting diode (UV-LED) system to disinfect domestic wastewater for discharge or agricultural reuse. *Water Research*, 153, 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.01.006>
- Mohamed, M. y Eissa, A. (2012). Pulsed Electric Fields for Food Processing Technology. *Structure and Function of Food Engineering*, 32. <https://doi.org/10.5772/1615>
- Muñoz, A., Caminiti, I. M., Palgan, I., Pataro, G., Noci, F., Morgan, D. J., Cronin, D. A., Whyte, P., Ferrari, G. y Lyng, J. G. (2012). Effects on *Escherichia coli* inactivation and quality attributes in apple juice treated by combinations of pulsed light and thermosonication. *Food Research International*, 45(1), 299-305. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.08.020>
- Muñoz, A., Palgan, I., Noci, F., Cronin, D. A., Morgan, D. J., Whyte, P. y Lyng, J. G. (2012). Combinations of selected non-thermal technologies and antimicrobials for microbial inactivation in a buffer system. *FRIN*, 47(1), 100-105. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.02.001>
- Nyangaresi, P. O., Qin, Y., Chen, G., Zhang, B., Lu, Y. y Shen, L. (2018). Effects of single and combined UV-LEDs on inactivation and subsequent reactivation of *E. coli* in water disinfection. *Water Research*, 147, 331-341. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.10.014>
- Oguma, K., Kita, R., Sakai, H., Murakami, M. y Takizawa, S. (2013). Application of UV light emitting diodes to batch and flow-through water disinfection systems. *DES*, 328, 24-30. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.08.014>
- Orlowska, M., Koutchma, T., Grapperhaus, M., Gallagher, J., Schaefer, R. y Defelice, C. (2013). Continuous and pulsed ultraviolet light for nonthermal treatment of liquid foods. Part 1: Effects on quality of fructose solution, apple juice, and milk. *Food and Bioprocess Technology*, 6(6), 1580-1592. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0779-8>
- Ouyang, B., Demirci, A. y Patterson, P. H. (2020). Inactivation of *Escherichia coli* K-12 in liquid egg white by a flow-through pulsed UV light treatment system. *Journal of Food Protection*, 83(3), 418-425. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.jfp-19-386>
- Pagal, G. A. y Gabriel, A. A. (2020). Individual and combined mild heat and UV-C processes for orange juice against *Escherichia coli* O157:H7. *LWT - Food Science and Technology*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109295>
- Palgan, I., Caminiti, I. M., Muñoz, A., Noci, F., Whyte, P., Morgan, D. J., Cronin, D. A. y Lyng, J. G. (2011a). Combined effect of selected non-thermal technologies on *Escherichia coli* and *Pichia fermentans* inactivation in an apple and cranberry juice blend and on product shelf life. *International Journal of Food Microbiology*, 151(1), 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2011.07.019>
- Palgan, I., Caminiti, I. M., Muñoz, A., Noci, F., Whyte, P., Morgan, D. J., Cronin, D. A. y Lyng, J. G. (2011b). Effectiveness of high intensity light pulses (HILP) treatments for the control of *Escherichia coli* and *Listeria innocua* in apple juice, orange juice and milk. *Food Microbiology*, 28(1), 14-20. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2010.07.023>
- Pataro, G., Muñoz, A., Palgan, I., Noci, F., Ferrari, G. y Lyng, J. G. (2011). Bacterial inactivation in fruit juices using a continuous flow Pulsed Light (PL) system. *Food Research International*, 44(6), 1642-1648. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.04.048>
- Pierscianowski, J., Popovi, V., Biancanello, M., Bissonnette, S., Zhu, Y. y Koutchma, T. (2021). Continuous-flow UV-C processing of kale juice for the inactivation of *E. coli* and assessment of quality parameters. *Food Research International*, 140. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.110085>
- Pirozzi, A., Pataro, G. y Donsi, F. (2020). Edible coating and pulsed light to increase the shelf life of food products. *Food Engineering Reviews*.
- Pommerville, J. C. (2004). *Alcamos fundamentals of microbiology*. J. & B. Learning.
- Popovi, V. y Koutchma, T. (2020). Characterizing the performance of a continuous-flow UV-LED system for treatment of juices and beverages using multiple wavelengths. *Food Engineering Reviews*.
- Prasad, A., Gänzle, M. y Roopesh, M. S. (2019). Inactivation of *Escherichia coli* and *Salmonella* using 365 and 395 nm high intensity pulsed light emitting diodes. *Foods*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/foods8120679>

- Putnik, P., Pavlič, B., Šojić, B., Zavadlav, S., Žuntar, I., Kao, L., Kitonić, D. y Kovačević, D. B. (2020). Innovative hurdle technologies for the preservation of functional fruit juices. *Foods*, 9(6), 1-36. <https://doi.org/10.3390/foods9060699>
- Ramos-Villarroel, A. Y., Martín-Belloso, O. y Soliva-Fortuny, R. (2011). Bacterial inactivation and quality changes in fresh-cut avocado treated with intense light pulses. *European Food Research and Technology*, 233(3), 395-402. <https://doi.org/10.1007/s00217-011-1533-6>
- Ramos-Villarroel, A. Y., Martín-Belloso, O. y Soliva-Fortuny, R. (2015). Combined effects of malic acid dip and pulsed light treatments on the inactivation of *Listeria innocua* and *Escherichia coli* on fresh-cut produce. *Food Control*, 52, 112-118. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.12.020>
- Rifna, E. J., Singh, S. K., Chakraborty, S. y Dwivedi, M. (2019). Effect of thermal and non-thermal techniques for microbial safety in food powder: Recent advances. *Food Research International*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108654>
- Roobab, U., Aadil, R. M., Madni, G. M. y Bekhit, A. E. (2018). The impact of nonthermal technologies on the microbiological quality of juices: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17, 437-457. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12336>
- Roohinejad, S., Koubaa, M., S. Sant'Ana, A. y Greiner, R. (2018). Mechanisms of microbial inactivation by emerging technologies. In *Innovative Technologies for Food Preservation*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811031-7.00004-2>
- Roohinejad, S., Parniakov, O., Nikmaram, N., Greiner, R. y Koubaa, M. (2018). Energy saving food processing. In *Sustainable Food Systems From Agriculture to Industry*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811935-8.00006-8>
- Rowan, N. J., Gregor, S. J. M. A. C., Anderson, J. G., Fouracre, R. A. y Ilvaney, L. M. C. (1999). *Pulsed-Light Inactivation of Food-Related Microorganisms*. 65(3), 1312-1315.
- Santamera, A., Escott, C., Loira, I., del Fresno, J. M., González, C. y Morata, A. (2020). Pulsed light: Challenges of a non-thermal sanitation technology in the wine-making industry. *Beverages*, 6(3), 45.
- Shriver, S., Yang, W., Chung, S. Y. y Percival, S. (2011). Pulsed ultraviolet light reduces immunoglobulin E binding to Atlantic white shrimp (*Litopenaeus setiferus*) extract. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(7), 2569-2583. <https://doi.org/10.3390/ijerph8072569>
- Singh, H., Bhardwaj, S. K., Khatri, M., Kim, K. y Bhardwaj, N. (2020). UVC radiation for food safety: An emerging technology for the microbial disinfection of food products. *Chemical Engineering Journal*, December. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128084>
- Song, K., Mohseni, M. y Taghipour, F. (2016). Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: A review. *Water Research*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.03.003>
- Song, K., Taghipour, F. y Mohseni, M. (2018). Microorganisms inactivation by continuous and pulsed irradiation of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs). *Chemical Engineering Journal*, 343, 362-370. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.03.020>
- Song, K., Taghipour, F. y Mohseni, M. (2019). Microorganisms inactivation by wavelength combinations of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs). *Science of the Total Environment*, 665, 1103-1110. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.041>
- Souza, V. R. y Koutchma, T. (2020). Ultraviolet light microbial inactivation in liquid foods. In *Innovative Food Processing Technologies: A Comprehensive Review*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22971-5>
- Souza, V. R., Koutchma, T. y Gerai, M. (2019). Repair mechanisms of UV-induced damage of microorganism in foods. In *Innovative Food Processing Technologies: A Comprehensive Review*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22943-0>
- Surjadinata, B. B., Jacobo-Velázquez, D. A. y Cisneros-Zevallos, L. (2017). UVA, UVB and UVC light enhances the biosynthesis of phenolic antioxidants in fresh-cut carrot through a synergistic effect with wounding. *Molecules*, 22(4), 668.
- Takeshita, K., Shibato, J., Sameshima, T., Fukunaga, S., Isobe, S., Arihara, K. y Itoh, M. (2003). Damage of yeast cells induced by pulsed light irradiation. *International Journal of Food Microbiology*, 85(1-2), 151-158. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(02\)00509-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(02)00509-3)
- Vipul, V., Gopisetty, S., Patras, A., Pendyala, B. y Kilonzo, A. (2018). UV-C Irradiation as an alternative treatment technique: Study of its effect on microbial inactivation, cytotoxicity, and sensory properties in cranberry-flavored water. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 52, 66-74.
- Vollmer, K., Chakraborty, S., Bhalariao, P. P., Carle, R., Frank, J. y Steingass, C. B. (2020). Effect of pulsed light treatment on natural microbiota, enzyme activity, and phytochemical composition of pineapple (*Ananas comosus* [L.] Merr.) juice. *Food and Bioprocess Technology*, 13(7), 1095-1109. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02460-7>
- Wekhof, A., Trompeter, F.-J. y Franken, O. (2001). Pulsed UV disintegration (PUVD): a new sterilisation mechanism for packaging and broad medical-hospital applications. *The First International Conference on Ultraviolet Technologies*, Table 1, 1-15.
- Xu, F., Wang, B., Hong, C., Tebeilaigen, S., Nsor-Atindana, J., Duan, Y. y Zhong, F. (2019). Optimization of spiral continuous flow-through pulse light sterilization for *Escherichia coli* in red grape juice by response surface methodology. *Food Control*, 105, 8-12. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.04.023>
- Ye, Z. y Forney, L. J. (2008). Optimum UV disinfection between concentric cylinders. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2008, 3444-3452.
- Ye, Z., Koutchma, T., Parisi, B., Larkin, J. y Forney, L. J. (2007). Ultraviolet inactivation kinetics of *Escherichia coli* and *Yersinia pseudotuberculosis* in annular reactors. *Food Engineering and Physical Properties Ultraviolet*, 72(5). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00397.x>



Cladodios (*Opuntia spp.*):

composición, compuestos bioactivos y sus beneficios en salud y nutrición

R. Aparicio-Ortuño*, M. T. Jiménez-Munguía, A. E. Ortega-Regules, T. S. Silva-Pereira y K. Villaseñor-López

*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos
Correos electrónicos: rocio.apariciooo@udlap.mx • ana.ortega@udlap.mx

RESUMEN

Los cladodios de nopal han sido un componente importante en la dieta de los mexicanos desde la época prehispánica, y también se utilizan como forraje y para el control de erosión del suelo, etcétera. En general, los cladodios tienen un alto valor nutricional debido a su contenido de fibra dietética, compuestos bioactivos, minerales y proteína. Dada su importancia, el objetivo del presente artículo fue llevar a cabo una revisión de diferentes aspectos de los cladodios de *Opuntia spp.*, tales como su composición química, los compuestos bioactivos presentes (polifenoles, flavonoides, fitoesteroles y clorofila), y sus diversas formas de consumo. También se exploraron los efectos benéficos en salud y nutrición, al coadyuvar en la prevención y/o mejoría de algunas enfermedades o padecimientos. Entre las propiedades con beneficios a la salud, se encontraron su capacidad antioxidante, antiinflamatoria, hipoglucémica y antiadipogénica, lo que ayuda a incentivar el desarrollo y consumo de cladodios en diversas aplicaciones.

Palabras clave: cladodio, *Opuntia spp.*, fibra dietética, compuesto bioactivo.

ABSTRACT

Cladodes of nopal have been used since the pre-Hispanic era as an important component of the Mexican diet. These are also used as fodder and soil erosion control, among other uses. Overall, cladodes have a high nutritional value due to their dietary fiber content, bioactive compounds, minerals and protein. Due to its importance, the objective of the present article was to carry out a review of the fundamental aspects of the cladodes of *Opuntia spp.*, such as their chemical and nutritional composition, the presence of the bioactive compounds (polyphenols, flavonoids, phytosterols and chlorophyll), and their diverse forms of consumption. Moreover, the beneficial health and nutritional effects have been explored concerning the prevention and/or improvement of some diseases or health conditions. Amongst the beneficial health properties, it has been discovered its antioxidant, anti-inflammatory, hypoglycemic and antiadipogenic capacity, which incentivizes the development and consumption of cladodes in various applications.

Keywords: cladode, *Opuntia spp.*, dietary fiber, bioactive compound.

INTRODUCCIÓN

Los cladodios de las especies *Opuntia spp.*, también llamados nopales, pertenecen a la familia de las cactáceas (Santos *et al.*, 2017). Estos son cactus adaptables al clima extremo, por lo que su cultivo requiere poca agua y pueden crecer en regiones áridas o semiáridas de todo el mundo. México es uno de los principales productores y también posee la mayor diversidad con al menos 126 especies (Santos *et al.*, 2017).

Los cladodios contienen compuestos bioactivos como polifenoles, flavonoides, carotenoides, ácido ascórbico, fitoesteroles y clorofila (Santos *et al.*, 2017). Estos pueden proporcionar beneficios importantes para la salud, como eliminar las sustancias químicas tóxicas; en otros casos mejoran la absorción y estabilidad de los nutrientes esenciales; y en algunos otros actúan ejerciendo efectos benéficos sobre la microbiota (factores de crecimiento, sustratos de fermentación, o inhibidores de bacterias intestinales dañinas) (Angulo *et al.*, 2014). Igualmente, su contenido de fibra dietética total previene trastornos gastrointestinales y enfermedades, especialmente aquellas asociadas con la baja ingesta de fibra dietética; también reduce los valores de glucosa en la sangre; y tiene efectos antihiperlipidémicos y antihipercolesterolémicos (Hernández *et al.*, 2011).

Por esta razón, la descripción e información sobre el consumo de los cladodios de *Opuntia spp.* puede ser de gran ayuda para promover su ingesta de forma que beneficie la salud y nutrición de la población en general y de personas con ciertos padecimientos o enfermedades crónicas. El objetivo de este artículo es llevar a cabo una revisión científica sobre los aspectos fundamentales de los cladodios de *Opuntia spp.*, su composición química, los compuestos bioactivos presentes y sus diversas formas de consumo. También se explorarán sus propiedades benéficas en salud y nutrición, pues son una fuente de fibra dietética y de cal-

cio, tienen propiedades antioxidantes, antiadipogénicas, hipoglucémicas y otros beneficios derivados de su consumo o de sus extractos bioactivos.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. Descripción de los cladodios

Los cactus de *Opuntia spp.* producen alimentos comestibles conocidos a nivel mundial como cladodios, nopales, tallos o pencas. Según la Norma Mexicana FF-068-SCFI-2006, los cladodios son el segmento de un tallo de las especies de los géneros *Opuntia spp.* de forma aplanada, provistos de hojas reducidas temporales, gloquidias (ahuates) y espinas en puntos específicos denominadas areolas. A los cladodios jóvenes (brotes tiernos) se les llama nopal verdura. Los cladodios se clasifican por grado de calidad, tamaño y variedad; su longitud va desde 7 cm (Cambray) hasta 25.1 cm o más, según la norma mexicana.

Para el Codex Alimentarius (2006), el nopal es el tallo modificado de las variedades comerciales de nopales obtenidos de *Opuntia ficus indica*, *O. tomentosa*, *O. hyptiacantha*, *O. robusta*, *O. inermis*, *O. undulata*, de la familia de las *Cactaceae*, que habrán de suministrarse frescos al consumidor, después de su acondicionamiento y envasado. La longitud del nopal puede variar de 9 a 30 cm.

Los cladodios de *Opuntia spp.* se cultivan en más de 30 países, entre los que se encuentran Italia, Chile, Sudáfrica, Israel, Colombia y Estados Unidos, siendo México uno de los principales productores. Para el año 2019, según datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), se sembraron 12,799 hectáreas de nopal verdura a nivel nacional, con una producción de 821,000 toneladas y un rendimiento promedio de 71 toneladas por ha.

Con relación a la cosecha de los cladodios en México, esta se lleva a cabo por lo general cuando alcanzan una longitud de 20 a 25 cm y pesan de 90 a 100 g. La cosecha se realiza durante todo el año, aunque la productividad aumenta en primavera (Saénz *et al.*, 2006). La especie más cultivada es *Opuntia ficus indica* de las variedades Milpa Alta, Copena V-1, Copena F-1, Atlixco, Jalpa, Esmeralda y blanco de Valtierra (Saénz *et al.*, 2006). Por otro lado, el consumo per cápita anual en 2015 fue de 6.4 kg (SAGARPA).

1.1. Características botánicas

La clasificación botánica del género *Opuntia* se encuentra dentro del reino *Plantae*, división *Magnoliophyta*, clase *Magnoliopsida*, orden *Caryophyllales*, familia *Cactaceae*, subfamilia *Opuntioideae* y género *Opuntia* (Paiva *et al.*, 2016). A los cactus se les conoce también por el nombre de peras espinosas y hay aproximadamente 130 géneros y 1,500 especies. Los tallos de los cactus son gruesos, suculentos y de forma oblonga, tienen una epidermis gruesa y cerosa, la mayoría de las hojas son espinosas, la floración se produce en los cladodios con uno o dos años y los cactus del género *Opuntia* son comestibles (Isaac, 2017).

Los cactus del género *Opuntia* son nativos de varios ecosistemas, desde zonas áridas hasta tierras de gran altitud, y pueden crecer en temperaturas que varían de los -40 °C hasta regiones muy cálidas, por lo que pueden ser sembrados en zonas donde difícilmente crecen otras plantas. Al respecto, estos cactus son adaptables a lugares con muy poca precipitación pluvial, pues poseen un sistema de raíces poco profundo que se extiende para facilitar la absorción de agua y nutrientes y, al iniciar la sequía, estas se contraen de manera radial contribuyendo a disminuir la pérdida de líquido. Asimismo, los cladodios se encuentran protegidos por una cutícula gruesa, la cual puede estar cubierta de cera o pelos que disminuyen la pérdida de agua, además de que el mucílago presente en los tejidos tiene la capacidad

de absorber y retener líquido y las espinas presentes ayudan a evitar la pérdida de agua por transpiración durante el día (Saénz *et al.*, 2006; Santos *et al.*, 2017).

1.2. Usos y formas de consumo

En los últimos años, el nopal ha sido reconocido como uno de los cultivos más importantes en la economía, debido a sus propiedades nutricionales, funcionales, terapéuticas, su potencial en las industrias cosmética, farmacéutica, bioenergética y por sus aplicaciones ecológicas (Ciriminna *et al.*, 2019). Debido a lo anterior, hay un gran interés en el cultivo y utilización de los cladodios más allá de su uso alimenticio o en forraje para el ganado. A su vez, la planta de *Opuntia ficus indica* hospeda al insecto cochinitilla (*Dactylopius spp.*), el cual es la fuente de un tinte rojo muy valorado, el ácido carmínico (Ciriminna *et al.*, 2019). Los cladodios también pueden consumirse después de remover las espinas, ya sea frescos, precocidos, cocidos (hervidos, a la parrilla, fritos, en ensaladas, sopas), en salmuera, fermentados, en jugos, salsas, mermeladas, dulces y cristalizados (Saénz *et al.*, 2006).

De igual manera, los cladodios en polvo se pueden añadir a productos elaborados con harina de trigo, incluyendo pastas, galletas, pan, barras (artículos de panificación en general), y a otros hechos con maíz, que pueden ser tortillas, tostadas y totopos; esto con el objetivo de incrementar el contenido de fibra, calcio, potasio y polifenoles (Barba *et al.*, 2020). Otro uso en polvo se basa en su venta en cápsulas para regular el peso, el azúcar en la sangre o como fuente de fibra (Stinzing y Carle, 2005).

Una de las aplicaciones investigadas para el mucílago de nopal en polvo es la microencapsulación de compuestos bioactivos —como polifenoles— o pigmentos como betalainas; además de su empleo como agente emulsionante, espesante, estabilizante y como recubrimiento comestible para conservar la fruta fresca (Barba *et al.*, 2020). Otro uso del mucílago es el reportado

por Lugo-Arias *et al.* (2020), donde se utilizó como agente coagulante en una mezcla con almidón de yuca para eliminar la turbidez durante los procesos de purificación de agua.

En el área de la cosmética, la pulpa de los cladodios se utiliza para elaborar champús, acondicionadores, cremas corporales, jabones, geles para el cabello y protectores solares (Stintzing y Carle, 2005). También se aplica en la generación de biomasa para producir biocombustibles y productos de energía verde, por ejemplo, bioetanol y biodiesel (Ciriminna *et al.*, 2019). Por otra parte, la siembra de los cactus de *Opuntia spp.* contribuye a la preservación de los ecosistemas al formar barreras físicas que ayudan a controlar el viento y mantener la fertilidad del suelo, y al ser forraje importante para el ganado en áreas donde escasea el agua para el cultivo de pastura (Isaac, 2017). Por otro lado, en un estudio llevado a cabo por Mandujano-Ruiz *et al.* (2017) se probó, con buenos resultados, la eficacia de un extracto de nopal *Opuntia ficus indica* como posible inhibidor de corrosión del acero al carbono.

2. Composición química y nutricional de los cladodios

En los cladodios frescos de *Opuntia spp.*, el componente principal es el agua (80-95 %), seguido de hidratos de carbono (3-7 %), fibra (1-2 %), proteínas (0.5-1 %) y otros compuestos incluyendo lípidos, vitaminas, minerales y compuestos bioactivos. Dentro de los hidratos de carbono, el 50 % corresponde al mucílago, líquido viscoso secretado por los cladodios, cuya función fisiológica es regular los flujos de calcio de la planta y el contenido de agua celular durante sequías prolongadas (Ginestra *et al.*, 2009).

La composición química y nutricional de los cladodios puede variar según el tipo de especie, las condiciones ambientales, la etapa de madurez, temporada de cosecha y el tratamiento poscosecha (Astello-García *et al.*, 2015; Aruwa *et al.*, 2018). Por ejemplo, en función de su madurez, el contenido de lípidos puede disminuir y el de hidratos de carbono aumentar. Además, la síntesis de proteínas puede incrementar como una protección celular cuando el suelo es demasiado ácido o salino. Por su parte, el contenido de algunos minerales depende de ciertos factores,

incluyendo el pH, la disponibilidad de agua, el tipo y composición del suelo (Hernández *et al.*, 2011). Con relación al contenido de fibra dietética en los cladodios, se ha observado que la fibra dietética insoluble aumenta con la madurez y la fibra dietética soluble disminuye (Hernández-Urbiola *et al.*, 2010).

2.1. Macronutrientes

Los hidratos de carbono son los compuestos más abundantes en los cladodios, con una variación según la especie de *Opuntia spp.*, que varía de 55 a 75 g por cada 100 g de materia seca (tabla I). Para la especie de *Opuntia ficus indica* se observan valores diferentes, pues los de Hernández *et al.* (2011) —originarios de México— y Msaddak *et al.* (2015) —procedentes de Túnez— presentan datos similares (55.15 g y 59.16 g por cada 100 g de materia seca, respectivamente), a diferencia del valor reportado por Nabil *et al.* (2020) —originarios de Marruecos—, que es de 74.27 g por cada 100 g de materia seca. La cantidad de hidratos de carbono puede variar de acuerdo con el estado de madurez de los cladodios en el momento del análisis, así como por las condiciones ambientales y del suelo en el país donde se cultivan (Aruwa *et al.*, 2018).

El mucílago de los cladodios está compuesto por arabinosa, galactosa, ramnosa, xilosa y ácido galacturónico, además de manosa, fucosa y glucosa (Ginestra *et al.*, 2009). Otros hidratos de carbono y polisacáridos no amiláceos se encuentran en la fibra dietética de los cladodios, como la celulosa, las hemicelulosas, los hemiglucanos y la inulina (Gray, 2006). En el Codex Alimentarius (2009), la fibra dietética se define así: «Polímeros de hidratos de carbono con 10 o más unidades de monómeros, que no son hidrolizados por las enzimas endógenas en el intestino delgado de los seres humanos». En particular, los cladodios contienen tanto fibra dietética soluble como insoluble, ya que en su composición presentan mucílago, pectina, hemicelulosa, celulosa y lignina (Bautista *et al.*, 2010). Las propiedades fisicoquímicas (solubilidad, hidratación y viscosidad) de la fibra dietética influyen en su comportamiento durante la digestión. Con base en su solubilidad en agua, se puede dividir en fibra soluble (pectinas, gomas, oligosacáridos, etc.) y en fibra insoluble (celulosa, lignina, etc.) (Capuano, 2017).

Tabla I. Composición química de los cladodios en diferentes especies de *Opuntia spp.*

Especie de <i>Opuntia spp.</i>	Humedad*	Proteína*	Lípidos*	CHO'S totales*	Fibra*	Cenizas*	Ca*	K*	P*	Mg*	Referencias
<i>Opuntia monacantha</i>	5.13	5.12	1.72	74.87	TDF: 45.36 IDF: 32.86 SDF: 12.50	18.29	2.75	4.55	0.19	1.05	Dick <i>et al.</i> (2020)
<i>Opuntia ficus indica</i>	8.10	7.43	3.02	59.16	28.84	27.78	0.45	2.27	-	0.59	Msaddak <i>et al.</i> (2015)
<i>Opuntia ficus indica</i>	9.55	8.76	2.30	74.27	41.04	11.90	5.52	1.24	0.34	1.54	Nabil <i>et al.</i> (2020)
<i>Opuntia ficus indica</i> variedad Redonda	4.18	7.07	1.87	-	TDF: 66.6 IDF: 56.8 SDF: 9.8	24.3	0.04	0.07	-	0.01	Aguilera-Barreiro <i>et al.</i> (2013)
<i>Opuntia ficus indica</i>	4.81	7.78	1.50	55.15	Fibra cruda: 19.12	19.12	2.86	6.97	0.46	1.2	Hernández <i>et al.</i> (2011)
<i>Opuntia ficus indica</i> variedad Atlixco	5.65	1.13	1.22	-	TDF: 64.25 IDF: 54.45 SDF: 9.8	16.54	-	-	-	-	Bensadón <i>et al.</i> (2010)
<i>O. streptacantha</i> <i>O. hyptiacantha</i> ^a <i>O. megacantha</i> ^a <i>O. albicarpa</i> ^a <i>O. ficus indica</i> ^a <i>O. humifusa</i> ^a	-	11.2 11.0 10.7 11.6 11.2 4.7	0.73 0.80 0.69 0.75 0.69 1.25	-	Fibra cruda: 7.3 6.5 6.5 6.5 5.9 50.3	12.6 15.1 13.6 13.2 14.4 2.0	0.67 0.74 0.70 0.64 0.63 1.97	2.21 2.69 1.96 1.96 2.40 1.27	-	-	Santos <i>et al.</i> (2017)
<i>O. ficus indica</i> variedad Atlixco ^b	-	12.6	0.90	-	Fibra cruda: 5.35	14.8	0.63	2.67	-	-	Astello-García <i>et al.</i> (2015)
<i>O. ficus indica</i> variedad Redonda	5.02	13.10	2.87	-	TDF: 51.42 IDF: 33.21 SDF: 18.21	19.61	1.76 (%)	6.84 (%)	0.34 (%)	-	Rodríguez-García <i>et al.</i> (2007)
<i>O. ficus indica</i> variedad Milpa Alta	2.73	12.90	1.10	-	TDF: 47.48 IDF: 41.80 SDF: 5.68	18.38	-	-	-	-	Ramírez-Romero <i>et al.</i> (2015)

* g/100 g en base seca

TDF: fibra dietética total; IDF: fibra dietética insoluble; SDF: fibra dietética soluble

^{a, b} Mediciones en %

Ca: calcio; K: potasio; P: fósforo; y Mg: magnesio

La composición de la fibra dietética total en los cladodios varía desde 45 a 66 g por cada 100 g de materia seca (tabla I). La fibra dietética insoluble (32.86-56.8 g por cada 100 g de materia seca) es mayor que la fibra dietética soluble (9.8-18.21 g por cada 100 g de materia seca) en todas las especies de *Opuntia spp.*, lo que denota una mayor cantidad de material celulósico en los cladodios en comparación con la de mucilago, ya que este está compuesto por fibra dietética soluble. Algunas de las especies con mayor cantidad de fibra dietética total son *Opuntia ficus indica* variedad Redonda y *Opuntia ficus indica* variedad Atlixco con 66.6 g y 64.25 g por cada 100 g de materia seca, respectivamente.

En cuanto al contenido de proteína presente en los cladodios, este puede variar desde 1 a 13.1 g por cada 100 g de materia seca (tabla I). Para *Opuntia ficus indica* variedad Atlixco se observan valores diferentes; el reportado por Bensadón *et al.* (2010) de 1.13 g por cada 100 g de materia seca, y el de Astello-García *et al.* (2015) de 12.6 g por cada 100 g de materia seca. Ello puede deberse a la etapa de madurez de los cladodios al momento del análisis y la síntesis de proteína en la planta (Astello-García *et al.*, 2015). Otras variedades de *O. ficus indica* con un alto contenido de proteína son Milpa Alta y Redonda (12.9 g y 13.10 g por cada 100 g de materia seca, respectivamente). Además, se han detectado 17 aminoácidos en los cladodios, que mayoritariamente son glutamina, leucina, lisina, valina, arginina, fenilalanina, isoleucina, treonina, metionina, triptófano e histidina (Hernández-Urbiola *et al.*, 2010; El-Mostafa *et al.*, 2014).

Los lípidos son el componente minoritario en los cladodios, dado que pueden variar de 0.69 a 3 g por cada 100 g de materia seca (tabla I). Además, se ha encontrado una fracción de esteroides en la clorofila de la corteza, junto con la presencia de sitosterol, ácidos grasos y terpenos (Stintzing y Carle, 2005), y ácidos grasos poliinsaturados como el ácido linoleico y linolénico (El-Mostafa *et al.*, 2014).

2.2. Micronutrientes

Los minerales que se encuentran en mayor cantidad en los cladodios son el calcio y el potasio, seguidos del fósforo y el magnesio (tabla I). Algunos autores han reportado una cantidad más alta de potasio que de calcio (Hernández *et al.*, 2011; Dick *et al.*, 2020) mientras que, en otros estudios, se informó una mayor cantidad de calcio, lo cual puede deberse al tipo y composición

del suelo. El calcio puede fluctuar de 0.04-5.5 g/100 g de materia seca, el potasio de 0.07-6.97 g/100 g de materia seca, el fósforo de 0.19-4.6 g/100 g de materia seca y el magnesio de 0.01-1.54 g/100 g de materia seca. En cuanto a las vitaminas, hay presencia de ácido ascórbico (vitamina C), riboflavina (vitamina B₂), niacina (vitamina B₃) y tiamina (vitamina B₁) (Stintzing y Carle, 2005).

2.3. Compuestos bioactivos

El vocablo *bioactivo* es un término alternativo para *biológicamente activo*, el cual refiere a una sustancia con actividad biológica; causa una reacción que desencadena una respuesta en el tejido vivo. Los compuestos bioactivos son sustancias químicas como polifenoles, flavonoides, ácidos fenólicos, vitaminas y carotenoides, entre otros, que se encuentran en pequeñas cantidades en plantas y ciertos alimentos, los cuales generan acciones en el cuerpo que pueden promover la buena salud (Guaadaoui *et al.*, 2014). Con relación a los polifenoles, sus estructuras químicas se caracterizan por la presencia de varios grupos fenólicos que pueden estar asociados con otros compuestos de alto peso molecular; además, son generalmente subproductos del metabolismo de las plantas (El-Mostafa *et al.*, 2014).

En el caso de los cladodios, los compuestos bioactivos presentes son, predominantemente, polifenoles, flavonoides, carotenoides y clorofila (Santos *et al.*, 2017). De estos, se han identificado más de 30 compuestos con propiedades antioxidantes, algunos de los cuales son kaempferol, quercetina, isorhamnetina, ácido gálico, glucósidos de isorhamnetina, narcisina, nicotiflorina y el ácido p-hidroxibenzoico. Con respecto a los carotenoides, la luteína, el β -caroteno y la β -criptoxantina son los más abundantes (Santos *et al.*, 2017; Barba *et al.*, 2020). En la tabla II se muestran diferentes compuestos bioactivos encontrados y cuantificados en los cladodios de diferentes especies. Los de *Opuntia ficus indica* son kaempferol, isorhamnetina, quercetina, narcisina, ácido ferúlico, betacianinas y betaxantinas, entre otros. Para las especies de *O. robusta*, *O. streptacantha* y *O. undulata*, se han identificado kaempferol e isorhamnetina. Otros autores solo mencionan el contenido total de ácidos fenólicos y flavonoides (Santos-Zea *et al.*, 2011) para *O. megacantha* y *O. albicapa*, al igual que Astello-García *et al.* (2015) para *O. streptacantha*, *O. hyptiacantha*, *O. megacantha* y *O. ficus indica*.

Tabla II. Contenido de compuestos bioactivos y efectos benéficos de los cladodios en diferentes especies de *Opuntia spp.*

Especie de <i>Opuntia spp.</i>	Compuesto bioactivo	Concentración	Efectos benéficos	Referencias
<i>O. megacantha</i>	Ácidos fenólicos totales Flavonoides totales	6.7-19.5 mg GAE/g base seca 3.2-5.62 mg GAE/g base seca	Capacidad antioxidante, con propiedades antiaterogénicas al neutralizar la formación de Especies Reactivas de Oxígeno (ROS).	Santos <i>et al.</i> (2017)
<i>O. rastrera</i>	Ácidos fenólicos totales Kaempferol Isorhamnetina	0.39 mg/g base seca 28.9 µg/g base seca 199.8 µg/g base seca	Efecto citotóxico en cáncer de colon en humanos (extracto de <i>O.ficus indica</i> o glicósido purificado de isorhamnetina).	
<i>O. robusta</i>	Kaempferol Isorhamnetina	45.6 µg/g base seca 99.58 µg/g base seca		
<i>O. streptacantha</i>	Kaempferol Isorhamnetina	42.2 µg/g base seca 59.9 µg/g base seca		
<i>O. albicapa</i>	Ácidos fenólicos totales Flavonoides totales	5.83-18 mg GAE/g base seca 2.5-5.62 mg QE/g base seca		
<i>O. ficus indica</i>	Ácidos fenólicos totales Flavonoides totales	6.8-18 mg GAE/g base seca 5.3-6.1 mg QE/g base seca		
<i>O. undulata</i>	Kaempferol Isorhamnetina	12.9 µg/g base seca 326.9 µg/g base seca		
<i>O. ficus indica</i>	Ácido gálico Coumarico 3,-4 Dihydroxibenzoico 4-Hidroxybenzoico Ácido ferúlico Isoquercetina Isorhamnetina-3- <i>O</i> - Nicotiflorina Rutin Narcisin	0.64-2.37 mg/100 g 14.08-16.18 mg/100 g 0.06-5.02 mg/100 g 0.5-4.72 mg/100 g 0.56-34.77 mg/100 g 2.29-39.67 mg/100 g 4.59-32.21 mg/100 g 2.89-146.5 mg/100 g 2.36-26.17 mg/100 g 14.69-137.1 mg/100 g	Mecanismo antiinflamatorio y neuroprotector (nicotiflorina) al atenuar el déficit neurológico inducido por isquemia.	El-Mostafa <i>et al.</i> (2014)
<i>O. ficus indica</i>	Ácido piscidico I Ácido eucomico Kaempferol Isorhamnetina Narcisina Polifenoles totales	967.2 mg/100 g 48.8 mg/100 g 6.8 mg/100 g 254.4 mg/100 g 75.2 mg/100 g 1446.8 mg/100 g	Capacidad antioxidante, simulación de digestión gastrointestinal con una alta bioaccesibilidad y absorción intestinal de los polifenoles.	Missaoui <i>et al.</i> (2020)
<i>O. streptacantha</i>	Ácidos fenólicos Flavonoides	56.8 µmol GAE/g base seca 18.0 µmol QE/g base seca	Capacidad antioxidante de los polifenoles, actividad antitumoral y antiinflamatoria (kaempferol).	Astello-García <i>et al.</i> (2015)
<i>O. hyptiacantha</i>	Ácidos fenólicos Flavonoides	33.4 µmol GAE/g base seca 17.1 µmol QE/g base seca		
<i>O. megacantha</i>	Ácidos fenólicos Flavonoides	44.7 µmol GAE/g base seca 16.8 µmol QE/g base seca		
<i>O. ficus indica</i>	Ácidos fenólicos Flavonoides	40.1 µmol GAE/g base seca 19.4 µmol quercetina/g base seca		

Tabla II. Contenido de compuestos bioactivos y efectos benéficos de los cladodios en diferentes especies de *Opuntia spp.* (continuación)

Especie de <i>Opuntia spp.</i>	Compuesto bioactivo	Concentración	Efectos benéficos	Referencias
<i>O. ficus indica</i>	Ácido ascórbico Betacianinas Betaxantinas Carotenos Fenoles	182.36 mg/100 g base seca 5.02 mg/kg 3.52 mg/kg 254.75 µg/g base seca 203.18 mg/kg	Contenido y capacidad antioxidante mayor en los cladodios en polvo, se pueden formular alimentos saludables.	Du Toit <i>et al.</i> (2018)
<i>O. ficus indica</i> variedad Milpa Alta	Fenoles totales Flavonoides Quercitina Kaempferol Isorhamnetina B-Caroteno	60.0 g/kg base húmeda 20.79 g/kg base húmeda 1.995 g/kg base seca 2.201 g/kg base seca 4.065 g/kg base seca 1.16 g/kg base húmeda	El proceso de deshidratación conserva los compuestos bioactivos con beneficios a la salud humana en varias enfermedades crónicas (cáncer, hipertensión, cardiovasculares).	Medina-Torres <i>et al.</i> (2011)
<i>O. ficus indica</i> variedad Fresa	Isorhamnetina Quercitina Kaempferol Miricetina	0.62 mg/g base seca 1.80 mg/g base seca 0.47 mg/g base seca 4.27 mg/g base seca	Desarrollo de productos saludables con altos niveles de polifenoles.	Mena <i>et al.</i> (2018)
<i>O. ficus indica</i> de Ficodindia di San Cono	Flavonoides-antocianinas Flavonoides-flavonas Flavonoides-flavonoles Lignanos Otros fenoles Ácidos fenólicos	1440.19 mg/kg de fenoles 52.64 mg/kg de fenoles 357.59 mg/kg de fenoles 9.99 mg/kg de fenoles 86.17 mg/kg de fenoles 1453.83 mg/kg de fenoles	Propiedad antioxidante que neutraliza radicales libres reduciendo el estrés oxidativo que puede dañar moléculas como proteínas, ADN y lípidos.	Rocchetti <i>et al.</i> (2018)
<i>O. ficus indica</i> variedad Atlixco	Fenoles totales Carotenoides	2.69 g GAE/100 g base seca 21.32 g GAE/100 g base seca	Capacidad antioxidante sinérgica de los polifenoles y carotenoides con beneficios para la salud.	Bensadón <i>et al.</i> (2010)
<i>O. ficus indica</i> variedad Milpa Alta	Fenoles totales Carotenoides	3.71 g GAE/100 g base seca 22.84 g GAE/100 g base seca		
<i>O. ficus indica</i> variedad Jalpa	Fenoles totales	318.11 µg GAE/g base seca	Capacidad antioxidante de los cladodios en polvo e inhibición de radicales libres, su uso en alimentos procesados como pan o tortillas.	Santos-Zea <i>et al.</i> (2011)
<i>O. ficus indica</i> variedad Villanueva	Fenoles totales	593.10 µg GAE/g base seca		

GAE: ácido gálico, QE: quercetina.

3. Propiedades benéficas del consumo de cladodios y sus extractos bioactivos en la salud y nutrición

Los beneficios del consumo de cladodios y sus extractos bioactivos han sido sugeridos por la medicina tradicional con una base científica, gracias a numerosos modelos experimentales dedicados a la evaluación de sus compuestos para tratar diferentes enfermedades. Los estudios *in vitro* e *in vivo* son convergentes para

concluir que los extractos de *Opuntia ficus indica* presentan propiedades antioxidantes, antiadipogénicas, hipoglucémicas y antiinflamatorias para continuar con su exploración y desarrollo farmacológico (El-Mostafa *et al.*, 2014). En la tabla III se presenta un resumen de los diversos beneficios en salud y nutrición identificados. Estos se han observado *in vivo* en ratas y ratones, pero también en grupos de humanos saludables o con algún padecimiento de diabetes *mellitus* tipo 2, dislipidemias, sobrepeso u obesidad.

Tabla III. Beneficios de los cladodios en diferentes modelos experimentales

Tipo de producto e ingesta o dosis suministrada	Beneficio	Modelo experimental	Referencias
Cladodios de nopal fresco: 300 g diarios durante 3 días	Se observó capacidad antioxidante <i>in vitro</i> e <i>in vivo</i> en el plasma y sangre de sujetos sanos.	<i>in vitro</i> e <i>in vivo</i>	Ávila-Nava <i>et al.</i> (2014)
Fibra de <i>Opuntia ficus indica</i> (Litramine IQP G-002AS). 3 g/d durante doce semanas	Reducción de peso corporal en sujetos con sobrepeso y obesidad.	<i>in vivo</i>	Grube <i>et al.</i> (2013)
Cladodios frescos de <i>Opuntia ficus indica</i> variedad Milpa Alta. 250 g/d	Reduce la glucosa en sangre posprandial y la insulina sérica, e incrementa la actividad antioxidante en sujetos sanos y con diabetes tipo 2.	<i>in vivo</i>	López-Romero <i>et al.</i> (2014)
<i>Opuntia ficus indica</i> variedad Milpa Alta en polvo. 4 % de nopal/d durante siete días	Atenúa la esteatosis hepática y el estrés oxidativo en ratas obesas.	<i>in vivo</i>	Moran-Ramos <i>et al.</i> (2012)
<i>Opuntia ficus indica</i> variedad Milpa Alta en polvo. 4 %/d durante 28 días	Reduce adiposidad, inflamación intestinal y cambios en la microbiota y metabolismo de ratas obesas.	<i>in vivo</i>	Moran-Ramos <i>et al.</i> (2017)
<i>Opuntia ficus indica</i> en polvo. 3 g/d durante 90 días	Mejora el perfil lipídico en individuos con dislipidemia y sobrepeso/obesidad.	<i>in vivo</i>	Muñoz <i>et al.</i> (2014)
Extracto acuoso de <i>Opuntia ficus indica</i> variedad Milpa Alta. 500 mg/k de peso	Efecto hipocolesterolémico en ratones con hipercolesterolemia por inhibición de la lipasa pancreática.	<i>in vivo</i>	Padilla-Camberos <i>et al.</i> (2015)
<i>Opuntia ficus indica</i> en polvo variedad Milpa Alta. 50 mg/k de peso	Reduce la glucosa en sangre posprandial en ratas con diabetes inducida y la difusión de glucosa <i>in vitro</i> .	<i>in vitro</i> e <i>in vivo</i>	Nuñez-López <i>et al.</i> (2013)
<i>Opuntia ficus indica</i> en polvo variedad Milpa Alta. 100 g/d durante 21 días	Mejora la capacidad antioxidante y la concentración de polifenoles totales en plasma; disminuye la glucosa, los triglicéridos y el colesterol total y en sujetos sanos.	<i>in vivo</i>	Guevara-Araza <i>et al.</i> (2011)
Fibra de <i>Opuntia ficus indica</i> (Litramine IQP G-002AS). 500 mg/d durante 45 días	Promueve la excreción fecal de grasa en adultos sanos.	<i>in vivo</i>	Uebelhack <i>et al.</i> (2014)
Extracto de <i>Opuntia ficus indica</i> . 250 µg/k durante 16 días	Efecto quimiopreventivo sobre el estrés oxidativo y la genotoxicidad de la aflatoxina B1 en ratones.	<i>in vivo</i>	Brahmi <i>et al.</i> (2011)

3.1. Fuente de fibra dietética

En las últimas décadas, los cambios relacionados con una alimentación deficiente han llevado a desarrollar problemas de salud; por ejemplo, diabetes, cáncer de colon, hipertensión, y otros desórdenes metabólicos, por lo que el consumo de fibra dietética ha cobrado relevancia. La ingesta de fibra dietética tiene un papel preventivo y terapéutico importante contra estos padecimientos (Corte *et al.*, 2011). Algunas propiedades de

la fibra dietética son la disminución en el tiempo de tránsito intestinal y que el aumento en el volumen de las deposiciones es fermentable por la microflora colónica, también previene trastornos gastrointestinales, reduce los niveles de colesterol total y los niveles posprandiales de glucosa y/o insulina en la sangre (Capuano, 2017).

Por otra parte, la fibra dietética puede transportar una cantidad significativa de compuestos bioactivos, tales como poli-

fenoles y carotenoides vinculados a la matriz de fibra a través del intestino humano. En promedio, el 2.5 % de la fibra dietética insoluble consiste en polifenoles (Bensadón *et al.*, 2010).

3.2. Fuente de calcio

La osteoporosis es un problema de salud pública en las mujeres mexicanas de 50 años o más, con una prevalencia del 16 % en osteoporosis y del 57 % en osteopenia, cuya consecuencia son fracturas asociadas a la baja masa ósea. La ingesta de calcio es esencial para el crecimiento y mantenimiento de hueso. De acuerdo con los National Institutes of Health (2019), en las mujeres pre y posmenopáusicas el requerimiento de calcio es de 1,200 mg/día. La ingesta de nopal deshidratado puede ser una excelente fuente de calcio en la dieta para mejorar o mantener la salud ósea (la densidad mineral ósea) y la calciuria (el balance de calcio en el organismo), como medida preventiva de la osteoporosis en mujeres pre y posmenopáusicas con baja masa ósea (Aguilera-Barreiro *et al.*, 2013).

En general, los cladodios de *Opuntia spp.* contienen más calcio (*Opuntia ficus indica* 5.52 g/100 g, según Nabil *et al.*, 2020) que otras verduras como las espinacas (1.15 g/100 g), lechuga (0.80 g/100 g) y col (0.50 g/100 g) (Santos *et al.*, 2017).

3.3. Propiedad antioxidante

El estrés oxidativo se asocia con el proceso general de envejecimiento y la muerte celular que afecta a los principales sistemas de órganos y tiene relación con todas las enfermedades cardiovasculares (Brieger *et al.*, 2012).

Aunado a esto, los antioxidantes son sustancias que, en bajas concentraciones, previenen o retrasan la oxidación de biomoléculas como lípidos, proteínas y ácidos nucleicos; y contrarrestan los radicales libres para evitar el daño oxidativo. La propiedad antioxidante se reconoce por la habilidad de eliminar o barrer los radicales libres, lo que protege a las células contra los efectos perjudiciales de las especies reactivas de oxígeno (Ndhkala *et al.*, 2010).

Esta propiedad antioxidante es uno de los principales mecanismos para que los cladodios proporcionen beneficios a la salud, gracias a que los polifenoles presentes en su composición tienen la capacidad de donar un átomo de hidrógeno o un electrón a un radical libre (u otras especies reactivas) y proteger a las células contra la oxidación (Andreu *et al.*, 2018). Se ha informado que los cladodios en polvo presentan un mayor contenido y capacidad antioxidante respecto a los cladodios frescos. Esto se debe a que se ha observado que el calor impacta las paredes de los tejidos celulares, lo que provoca que los antioxidantes sean liberados; además, el tratamiento térmico inactiva ciertas enzimas que pudieran afectarlos. Por otra parte, el calor provoca la formación de nuevos grupos estructurales que aumentan la actividad antioxidante; por ejemplo, la formación de grupos hidroxilo y cambios en la estructura de los polifenoles aumenta la capacidad antioxidante del ácido gálico. Estos cambios también permiten que los antioxidantes sean más estables al pH y su actividad antioxidante continúe a lo largo del tracto digestivo (Du Toit *et al.*, 2018).

En el mismo contexto, se ha observado en estudios *in vitro* que los extractos etanólicos de cladodios de *Opuntia ficus indica* pueden reducir la producción de moléculas clave liberadas en la inflamación crónica como óxido nítrico, glicosoaminoglicanos y especies reactivas de oxígeno, al inhibir su producción en las células a través de la supresión de ciertas proteínas y expresiones del RNA mensajero, lo que puede retardar la neurotoxicidad y aligerar los daños resultantes en las células. Asimismo, las beta-lainas de la pulpa en fresco de los cladodios pueden ayudar en los trastornos degenerativos que afectan a la función endotelial; por ejemplo, en la aterosclerosis, aterotrombosis, isquemia y accidente cerebrovascular al disminuir la expresión de moléculas de adhesión celular debido a sus propiedades antioxidantes (El-Mostafa *et al.*, 2014).

3.4. Propiedad antiadipogénica

La propiedad antiadipogénica o hipolipemiante se refiere a cualquier sustancia con la propiedad de disminuir los niveles

de lípidos en la sangre. Dentro de los hipolipemiantes naturales se encuentran la fibra dietética, los ácidos grasos monoinsaturados y poliinsaturados, los fitoesteroles y los antioxidantes (como polifenoles y flavonoides). El consumo de alimentos con estas características puede ayudar a reducir las concentraciones séricas del colesterol total y los triglicéridos (Ramírez y Román, 2018).

De acuerdo con lo anterior, los cladodios de nopal de *Opuntia ficus indica* pueden tener múltiples efectos sobre el metabolismo, en la regulación de lípidos, colesterol total, lipoproteína de alta densidad y lipoproteína de baja densidad; los polifenoles inhiben la enzima lipasa pancreática, la cual cataliza la hidrólisis de los triglicéridos para ser absorbidos por el cuerpo; además, el nivel de colesterol se reduce y se previene la hiperlipidemia (Padilla-Camberos *et al.*, 2015). De igual forma, el contenido de fibra dietética reduce los niveles de colesterol en hiperlipidemias, mejora la función de las plaquetas y contribuye a prevenir el riesgo ateroesclerótico (Santos *et al.*, 2017).

3.5. Propiedad hipoglucémica

La diabetes *mellitus* tipo 2 es una enfermedad multifactorial que incluye determinantes genéticos de la persona y su estilo de alimentación (Santos *et al.*, 2017). Se considera un problema de salud a nivel mundial con una incidencia creciente, que puede invalidar con el tiempo a quien la padece con complicaciones al sistema vascular, riñón, corazón, nervios u ojos, etcétera (Santos *et al.*, 2017).

La ingesta de cladodios de *Opuntia spp.* mejora la respuesta posprandial de glucosa e insulina en sangre en estudios llevados a cabo en animales de laboratorio y pacientes diabéticos. Además, se ha observado que la eficacia hipoglucémica puede ser mayor en los extractos de *Opuntia ficus indica* que han sido sometidos a un tratamiento térmico (Santos *et al.*, 2017). Este beneficio hipoglucémico puede deberse al contenido de fibra dietética de los cladodios, ya que hace más lenta la absorción de glucosa al aumentar la viscosidad de los alimentos en el intestino; otra hipótesis está

relacionada con el estímulo de su ingesta para secretar insulina a través de una acción directa sobre las células beta pancreáticas. De igual forma, los compuestos bioactivos de los cladodios pueden apoyar en la prevención de complicaciones cardiovasculares derivadas de la diabetes, ya que ejercen un efecto inhibitorio sobre el estrés oxidativo generado por glucosa alta (Santos *et al.*, 2017).

3.6. Otros beneficios

Se ha estudiado la actividad antimicrobiana de los extractos metanólicos, etanólicos o acuosos de *Opuntia ficus indica* sobre el crecimiento de *Campylobacter jejuni* y *Campylobacter coli* (microorganismos causantes de gastroenteritis bacteriana transmitida en los humanos por los alimentos) y *Clostridium perfringens*. También se ha estudiado el efecto bactericida en *Vibrio cholerae*, siendo el extracto metanólico el más eficiente. Los extractos alteran la membrana celular, lo que conduce a un aumento en la permeabilidad de esta y ello, a su vez, deviene en un decremento en el pH y el ATP. La concentración mínima bactericida se observó en diferentes variedades de *Opuntia ficus indica*; para *Campylobacter jejuni* fue de 1.1 a 12.5 mg/ml, de 4.4 a 30 mg/ml para *Vibrio cholerae* y de 0.8 a 16 mg/ml para *Clostridium perfringens*. De tal manera, hay un interés farmacológico en *Opuntia ficus indica* para prevenir la contaminación de alimentos por *Campylobacter* y *Vibrio cholerae*, así como para el tratamiento del tracto intestinal por trastornos asociados con estos microorganismos (El-Mostafa *et al.*, 2014; Sánchez *et al.*, 2014).

También se utiliza *Opuntia ficus indica* en medicina tradicional para tratar quemaduras, heridas, edema, obesidad, gastritis y sus extractos alcohólicos como analgésicos, antiinflamatorios, protectores de las capas mucosas y antivirales (El-Mostafa *et al.*, 2014; Osuna-Martínez *et al.*, 2014).

Diferentes estudios han evaluado los beneficios de extractos de *Opuntia ficus indica* en el tratamiento de los síntomas de la resaca en los seres humanos, que se debe en parte a la inflamación y alteración de los lípidos. Síntomas que incluyen náuseas,

sequedad en la boca y anorexia se redujeron al ser ingerido el extracto de *Opuntia ficus indica* cinco horas antes del consumo de alcohol (Osuna-Martínez *et al.*, 2014).

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Los artículos revisados en el presente documento compilan información sobre los cladodios de *Opuntia spp.* y su importancia botánica como especie adaptable en regiones áridas, pues pueden constituir una alternativa nutritiva, y a su vez económica, de alimento en lugares donde otro tipo de cultivos son limitados. Los diversos estudios sobre su composición demuestran que el contenido de fibra dietética y compuestos bioactivos son un gran incentivo para continuar los estudios de especies *Opuntia spp.* endémicas, los cuales permitirán profundizar en su composición química y nutrimental, diversificarán sus formas de uso e incentivarán su ingesta.

Al analizar las ventajas en salud y nutrición relacionadas con el consumo de cladodios y sus extractos, se han encontrado estudios experimentales (en animales y humanos) donde se presentan propiedades antioxidantes, antiadipogénicas y antiinflamatorias benéficas.

El consumo de cladodios de nopal en fresco no suele ser del agrado de muchas personas, en especial de los niños, ya sea por su sabor y/o consistencia. Por ello, los cladodios en polvo pueden ser una línea de investigación para el desarrollo de nuevos productos.

En conclusión, los cladodios de *Opuntia spp.* son una fuente accesible de fibra dietética y compuestos bioactivos con beneficios asociados a la nutrición y salud, por lo que su consumo puede prevenir o ayudar a tratar ciertos padecimientos o enfermedades.

AGRADECIMIENTOS

La autora R. Aparicio-Ortuño agradece a la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) — hoy Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) — por el financiamiento de sus estudios de posgrado.

REFERENCIAS

- Aguilera-Barreiro, M., Rivera-Márquez, J. A., Trujillo-Arriaga, H. M., Tamayo y Orozco, J. A., Barreira-Mercado, E. y Rodríguez-García, M. E. (2013). Intake of dehydrated nopal (*Opuntia ficus indica*) improves bone mineral density and calciuria in adult Mexican women. *Food & Nutrition Research*, 57(1).
- Andreu, L., Nuncio-Jáuregui, N., Carbonell-Barrachina, Á. A., Legua, P. y Hernández, F. (2018). Antioxidant properties and chemical characterization of Spanish *Opuntia ficus-indica* Mill. cladodes and fruits: Bioactive compounds of Spanish *Opuntia ficus-indica*. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(4), 1566-1573.
- Angulo, B., Martínez, C. y Paredes, L. (2014). Phytochemical Content, Nutritional Potential and Biotechnological Applications of an Ancient Mexican Plant: Nopal (*Opuntia ficus-indica*). *Current Nutrition & Food Science*, 10(3), 196-217.
- Aruwa, C. E., Amoo, S. O. y Kudanga, T. (2018). *Opuntia* (Cactaceae) plant compounds, biological activities and prospects - A comprehensive review. *Food Research International*, 112, 328-344.
- Astello-García, M. G., Cervantes, I., Nair, V., Santos-Díaz, M. del S., Reyes-Agüero, A., Guéraud, F., Negre-Salvayre, A., Rossignol, M., Cisneros-Zevallos, L. y Barba de la Rosa, A. P. (2015). Chemical composition and phenolic compounds profile of cladodes from *Opuntia spp.* Cultivars with different domestication gradient. *Journal of Food Composition and Analysis*, 43, 119-130.
- Ávila-Nava, A., Calderón-Oliver, M., Medina-Campos, O. N., Zou, T., Gu, L., Torres, N., Tovar, A. R. y Pedraza-Chaverri, J. (2014). Extract of cactus (*Opuntia ficus indica*) cladodes scavenges reactive oxygen species *in vitro* and enhances plasma antioxidant capacity in humans. *Journal of Functional Foods*, 10, 13-24.
- Barba, J., García, C., Fessard, A., Munekata, S., Lorenzo, M., Aboudia, A., Ouadia, A. y Remize, F. (2020). *Opuntia Ficus Indica* Edible Parts: A Food and Nutritional Security Perspective. *Food Reviews International*, 1-23.
- Bautista, J., Pineda, T., Camarena, A., Alanís, G., Da Mota, V. y Barboza, C. (2010). El nopal fresco como fuente de fibra y calcio en panqués. *Acta Universitaria*, 20(3), 11-17.
- Bensadón, S., Hervert-Hernández, D., Sáyago-Ayerdi, S. G. y Goñi, I. (2010). By-Products of *Opuntia ficus-indica* as a Source of Antioxidant Dietary Fiber. *Plant Foods for Human Nutrition*, 65(3), 210-216.
- Brahmi, D., Bouaziz, C., Ayed, Y., Ben Mansour, H., Zourgui, L. y Bacha, H. (2011). Chemo preventive effect of cactus *Opuntia ficus indica* on oxidative stress and genotoxicity of aflatoxin B₁. *Nutrition & Metabolism*, 8(1), 73.
- Brieger, K., Schiavonea, S., Miller, F. y Heinz, K. (2012). Reactive oxygen species: from health to disease. *Swiss Medical Weekly*, 142: w13659.
- Capuano, E. (2017). The behavior of dietary fiber in the gastrointestinal tract deter-

- mines its physiological effect. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(16), 3543-3564.
- Ciriminna, R., Chavarria-Hernández, N., Rodríguez-Hernández, A. I. y Pagliaro, M. (2019). Toward unfolding the bioeconomy of nopal (*Opuntia spp.*). *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 13(6), 1417-1427.
- Codex Alimentarius. (2005). *Norma para el nopal*. CODEX-STAN-185-1993.
- Corte, O., Martínez, F. y Ortiz, A. (2011). Efecto del consumo de la fibra dietética en la expresión cuantitativa del receptor de butirato GPR43 en colon de ratas. *Nutrición Hospitalaria*, 26(5), 1052-1058.
- Dick, M., Limberger, C., Cruz Silveira Thys, R., de Oliveira Rios, A. y Hickmann Flôres, S. (2020). Mucilage and cladode flour from cactus (*Opuntia monacantha*) as alternative ingredients in gluten-free crackers. *Food Chemistry*, 314.
- Du Toit, A., de Wit, M., Osthoff, G. y Hugo, A. (2018). Antioxidant properties of fresh and processed cactus pear cladodes from selected *Opuntia ficus-indica* and *O. robusta* cultivars. *South African Journal of Botany*, 118, 44-51.
- El-Mostafa, K., El Kharrassi, Y., Badreddine, A., Andreoletti, P., Vamecq, J., El Kebbab, M., Latruffe, N., Lizard, G., Nasser, B. y Cherkaoui-Malki, M. (2014). Nopal Cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a Source of Bioactive Compounds for Nutrition, Health and Disease. *Molecules*, 19(9), 14879-14901.
- Ginestra, G., Parker, M. L., Bennett, R. N., Robertson, J., Mandalari, G., Narbad, A., Lo Curto, R. B., Bisignano, G., Faulds, C. B. y Waldron, K. W. (2009). Anatomical, Chemical, and Biochemical Characterization of Cladodes from Prickly Pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(21), 10323-10330.
- Gray, J. (2006). Dietary Fibre, ILSI Europe Concise Monograph Series. *International Life Sciences Institute*, 1-35.
- Grube, B., Chong, P., Lau, K. y Orzechowski, H. (2013). A natural fiber complex reduces body weight in the overweight and obese: A double-blind, randomized, placebo-controlled study. *Obesity*, 21(1), 58-64.
- Guaadaoui, A., Benaicha, S., Elmajdoub, N., Bellaoui, M. y Hamal, A. (2014). What is a Bioactive Compound? A Combined Definition for a Preliminary Consensus. *International Journal of Nutrition and Food Sciences*, 3(3), 174-179.
- Guevara-Arauz, J. C., Órnelas, P., Rosales, M., Soria, G., Paz, M. y Pimentel, G. (2011). Biofunctional activity of tortillas and bars enhanced with nopal. Preliminary assessment of functional effect after intake on the oxidative status in healthy volunteers. *Chemistry Central Journal*, 5(1), 1-10.
- Hernández, U., Pérez, T. y Rodríguez, G. (2011). Chemical Analysis of Nutritional Content of Prickly Pads (*Opuntia ficus indica*) at Varied Ages in an Organic Harvest. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(5), 1287-1295.
- Hernández-Urbiola, M. I., Contreras-Padilla, M., Pérez-Torrero, E., Hernández-Quevedo, G., Rojas-Molina, J. I., Cortes, M. E. y Rodríguez-García, M. E. (2010). Study of Nutritional Composition of Nopal (*Opuntia ficus indica* cv. Redonda) at Different Maturity Stages. *The Open Nutrition Journal*, 4(1), 11-16.
- Isaac, A. A. (2017). Overview of Cactus (*Opuntia Ficus-Indica* (L)): A Myriad of Alternatives. *Studies on Ethno-Medicine*, 10(2), 195-205.
- López-Romero, P., Pichardo-Ontiveros, E., Avila-Nava, A., Vázquez-Manjarrez, N., Tovar, A. R., Pedraza-Chaverri, J. y Torres, N. (2014). The Effect of Nopal (*Opuntia Ficus Indica*) on Postprandial Blood Glucose, Incretins, and Antioxidant Activity in Mexican Patients with Type 2 Diabetes after Consumption of Two Different Composition Breakfasts. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 114(11), 1811-1818.
- Lugo-Arias, J., Lugo-Arias, E., Ovallos-Gazabon, D., Arango, J., De la Puente, M. y Silva, J. (2020). Effectiveness of the mixture of nopal and cassava starch as clarifying substances in water purification: A case study in Colombia. *Heliyon*, 6(6).
- Mandujano-Ruiz, A., Morales-Hernández, J., Herrera-Hernández, H., Corona-Almazán, L. E. y Juárez García, J. M. (2017). Evaluación del comportamiento electroquímico del extracto de nopal (*Opuntia Ficus-Indica*) como posible inhibidor de corrosión. *Revista de Metalurgia*, 53(4), 108.
- Medina-Torres, L., Vernon-Carter, E. J., Gallegos-Infante, J. A., Rocha-Guzman, N. E., Herrera-Valencia, E. E. y Calderas, F. (2011). Study of the antioxidant properties of extracts obtained from nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) cladodes after convective drying. *J Science Food Agricultural*, 91, 1001-1005.
- Mena, P., Tassotti, M., Andreu, L., Nuncio-Jáuregui, N., Legua, P., Del Rio, D. y Hernández, F. (2018). Phytochemical characterization of different prickly pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) cultivars and botanical parts: UHPLC-ESI-MSn metabolomics profiles and their chemometric analysis. *Food Research International*, 108, 301-308.
- Missaoui, M., D'Antuono, I., D'Imperio, M., Linsalata, V., Boukhchina, S., Logrieco, A. F. y Cardinali, A. (2020). Characterization of Micronutrients, Bioaccessibility and Antioxidant Activity of Prickly Pear Cladodes as Functional Ingredient. *Molecules*, 25(9).
- Morán-Ramos, S., Avila-Nava, A., Tovar, A. R., Pedraza-Chaverri, J., López-Romero, P. y Torres, N. (2012). *Opuntia ficus indica* (Nopal) Attenuates Hepatic Steatosis and Oxidative Stress in Obese Zucker (fa/fa) Rats. *The Journal of Nutrition*, 142(11), 1956-1963.
- Morán-Ramos, S., He, X., Chin, E. L., Tovar, A. R., Torres, N., Slupsky, C. M. y Raybould, H. E. (2017). Nopal feeding reduces adiposity, intestinal inflammation and shifts the cecal microbiota and metabolism in high-fat fed rats. *PLOS ONE*, 12(2).
- Msaddak, L., Siala, R., Fakhfakh, N., Ayadi, M. A., Nasri, M. y Zouari, N. (2015). Cladodes from prickly pear as a functional ingredient: Effect on fat retention, oxidative stability, nutritional and sensory properties of cookies. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 66(8), 851-857.

- Muñoz, L., Díaz, Y., González, C., Medina, E. y Cardona, E. (2014). Efecto de la administración oral de nopal deshidratado sobre el perfil de lípidos en individuos con dislipidemia y sobrepeso/obesidad. *Revista Iberoamericana de Ciencias* 1(1), 11.
- Nabil, B., Ouaabou, R., Ouhammou, M., Essaadouni, L. y Mahrouz, M. (2020). Functional Properties, Antioxidant Activity, and Organoleptic Quality of Novel Biscuit Produced by Moroccan Cladode Flour *Opuntia ficus-indica*. *Journal of Food Quality*, 2020, 1-12.
- Ndhlala, A., Moyo, M. y Staden, J. (2010). Natural Antioxidants: Fascinating or Mythical Biomolecules? *Molecules*, 15(10), 6905-6930.
- Núñez-López, M. A., Paredes-López, O. y Reynoso-Camacho, R. (2013). Functional and Hypoglycemic Properties of Nopal Cladodes (*O. ficus-indica*) at Different Maturity Stages Using in Vitro and in Vivo Tests. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(46), 10981-10986.
- Osuna-Martínez, U., Reyes-Esparza, J. y Rodríguez-Fragoso, L. (2014). Cactus (*Opuntia ficus-indica*): A Review on its Antioxidants Properties and Potential Pharmacological Use in Chronic Diseases. *Natural Products Chemistry & Research*, 2(6), 1-8.
- Padilla-Camberos, E., Flores-Fernandez, J. M., Fernandez-Flores, O., Gutierrez-Mercado, Y., Carmona-de la Luz, J., Sandoval-Salas, F., Mendez-Carreto, C. y Allen, K. (2015). Hypocholesterolemic Effect and *In Vitro* Pancreatic Lipase Inhibitory Activity of an *Opuntia ficus-indica* Extract. *BioMed Research International*, 2015, 1-4.
- Paiva, P., Souza, I., Costa, M., Santos, A. y Coelho, L. (2016). *Opuntia sp.* Cactus: Biological Characteristics, Cultivation and Applications. *Advances in Research*, 7(3), 1-14.
- Programa FAO/OMS sobre Normas Alimentarias. (2009). *Fibra Dietética*. Comisión del Codex Alimentarius.
- Ramírez, B. y Román, M. (2018). Sobre los alimentos con actividad hipolipemiante. *Revista cubana de cardiología y cirugía cardiovascular*, 28(2), 417-456.
- Ramírez-Moreno, E., Córdoba-Díaz, M., de Cortes Sánchez-Mata, M., Marqués, C. D. y Goñi, I. (2015). The addition of cladodes (*Opuntia ficus indica* L. Miller) to instant maize flour improves physicochemical and nutritional properties of maize tortillas. *LWT - Food Science and Technology*, 62(1), 675-681.
- Rocchetti, G., Pellizzoni, M., Montesano, D. y Lucini, L. (2018). Italian *Opuntia ficus-indica* Cladodes as Rich Source of Bioactive Compounds with Health-Promoting Properties. *Foods*, 7(2), 24.
- Rodríguez-García, M. E., de Lira, C., Hernández-Becerra, E., Cornejo-Villegas, M. A., Palacios-Fonseca, A. J., Rojas-Molina, I., Reynoso, R., Quintero, L. C., Del-Real, A., Zepeda, T. A. y Muñoz-Torres, C. (2007). Physicochemical Characterization of Nopal Pads (*Opuntia ficus indica*) and Dry Vacuum Nopal Powders as a Function of the Maturation. *Plant Foods for Human Nutrition*, 62(3), 107-112.
- Sáenz, C., Berger, H., Corrales, J., Galleti, Ljubica., García, V., Higuera, I., Mondragón, C., Rodríguez, A., Sepúlveda, E. y Varnero, M. (2006). Utilización agroindustrial del nopal. *Boletín de servicios agrícolas de la FAO*, 162.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2015). *Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero*. Gobierno de México.
- Secretaría de Economía. (2013). NMX-FF-068-SCFI-2006 Hortaliza fresca - nopal verdura (*Opuntia spp.*).
- Sánchez, E., Dávila-Aviña, J., Castillo, S. L., Heredia, N., Vázquez-Alvarado, R. y García, S. (2014). Antibacterial and Antioxidant Activities in Extracts of Fully Grown Cladodes of 8 Cultivars of Cactus Pear. *Journal of Food Science*, 79(4), M659-M664.
- Santos, M., Barba de la Rosa, P., Héliers, C., Guéraud, F. y Nègre, A. (2017). *Opuntia spp.*: Characterization and Benefits in Chronic Diseases. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 1-17.
- Santos-Zea, L., Gutiérrez-Urbe, J. A. y Serna-Saldivar, S. O. (2011). Comparative Analyses of Total Phenols, Antioxidant Activity, and Flavonol Glycoside Profile of Cladode Flours from Different Varieties of *Opuntia spp.* *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(13), 7054-7061.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2019). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. Gobierno de México.
- Stintzing, F. C. y Carle, R. (2005). Cactus stems (*Opuntia spp.*): A review on their chemistry, technology, and uses. *Molecular Nutrition & Food Research*, 49(2), 175-194.
- Uebelhack, R., Busch, R., Alt, F., Beah, Z. y Chong, P. (2014). Effects of Cactus Fiber on the Excretion of Dietary Fat in Healthy Subjects: A Double Blind, Randomized, Placebo-Controlled, Crossover Clinical Investigation. *Current Therapeutic Research*, 76, 39-44.
- U. S. Department of Health & Human Services. (2019). *Office of Dietary Supplements*. National Institutes of Health (NIH).

UDLAP[®]

Departamento de Ingeniería Química,
Alimentos y Ambiental