

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 13 - 2019**

Jocksan Morales Camacho

Milena Ramírez Rodrigues

Volumen 14 - 2020

Gabriel A. Cardoso Ugarte

Paola Hernández Carranza

Emma Maní López

Jocksan Morales Camacho

Nohemí Soto Reyes

Fátima Reyes Jurado

DISEÑO EDITORIAL

Angélica Cabañas Ramírez

CORRECCIÓN DE ESTILO

Andrea Garza Carbajal

Román Esaú Ocotitla Huerta

Beatriz Ramírez Berttolini

TSIA, año 13, volumen 13 (2019) y año 14, volumen 14 (2020) 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, mariaj.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 agosto de 2025.

UDLAP®



S O D I N Z E T N O U

VOL. 13

07.

Carta editorial
Volumen 13

08.

**Tratamientos con pulsos de luz de alta intensidad:
sus aplicaciones en la industria de los alimentos**

D. González-Albarrán, E. Palou-García y A. López-Malo

28.

Proteínas vegetales: métodos de extracción, propiedades
funcionales, bioactivas y aplicaciones en alimentos

Y. I. Delgado-García y J. I. Morales-Camacho

44.

**Compuestos nutritivos y bioactivos del amaranto
(*Amaranthus hypochondriacus*)**

A. E. Peláez-Castañeda y M. A. P. Porras-Loaiza

60.

**Combinación de luz ultravioleta de onda corta (uvc)
con otras tecnologías como tratamientos de
pasteurización de alimentos líquidos**

D. L. Gómez-Sánchez, N. Ramírez-Corona y A. López-Malo

71.

Alcances y limitaciones de la aplicación de aceites esenciales en alimentos

S. L. Recio-Cázares, A. López-Malo y E. Palou

72.

Uso de gomas naturales en la microencapsulación de pigmentos (antocianinas, betalaínas y carotenoides) mediante secado por atomización y liofilización

O. Jiménez-González y J.A. Guerrero-Beltrán

94.

Modificación de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas: factores de proceso y métodos no térmicos

J. E. González-Pérez y A. López-Malo

122.

Obtención de compuestos bioactivos y enzimas a partir de la fermentación de algas

A. Pérez-Alva, M. M. Ramírez-Rodrigues y D. K. Baigts-Allende

154.

Oleogeles basados en biopolímeros como sustitutos de lípidos saturados en productos alimentarios

J. C. Metri-Ojeda, D. K. Baigts-Allende y M. M. Ramírez-Rodrigues

172.

Métodos de sanitización de semillas para consumo directo y de semillas para germinados

A.E. García-Santiesteban, E. Palou y M.T. Jiménez-Munguía

186.

VOL. 14



VOL
13

Carta editorial

VOL.13

Estimados lectores,

Con gran entusiasmo presentamos el nuevo volumen de nuestra revista, en el que continuamos destacando temas de relevancia y actualidad en el campo de la ciencia y la tecnología de alimentos. Este número recoge una colección de artículos de revisión que ilustran la diversidad y profundidad de investigación en esta disciplina. Cada contribución refleja no solo el compromiso de los autores con la excelencia académica, sino también el impacto potencial que estas investigaciones pueden tener en la industria alimentaria y en la sociedad en general.

El volumen inicia con el artículo titulado «Tratamientos con pulsos de luz de alta intensidad: sus aplicaciones en la industria de alimentos»; en este trabajo, los autores exploran los avances y perspectivas de una tecnología innovadora que promete ser una herramienta efectiva para mejorar la inocuidad y la calidad de los alimentos. Enseguida, el artículo «Proteínas vegetales: métodos de extracción, propiedades funcionales, bioactivas y aplicaciones en alimentos» analiza detalladamente las potencialidades de las proteínas de origen vegetal, un tema cada vez más relevante en el contexto de la sostenibilidad y la nutrición. El artículo «Compuestos nutritivos y bioactivos del amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*)» destaca las propiedades nutricionales y bioactivas de este grano ancestral, así como sus aplicaciones en el diseño de nuevos alimentos funcionales. Finalmente, cerramos con el artículo «Combinación de luz ultravioleta de onda corta (uvc) con otras tecnologías como tratamientos de pasteurización de alimentos líquidos», en donde se analizan estrategias híbridas que integran tecnologías emergentes para garantizar la seguridad y estabilidad de los alimentos líquidos.

Quisiera aprovechar este espacio para expresar mi más sincero agradecimiento a los autores que comparten con nosotros sus investigaciones, y particularmente a los colegas que dedican una parte significativa de su tiempo a la formación y mentoría de nuestros estudiantes, guiándolos en su desarrollo como nuevos investigadores. También extiendo mi gratitud al cuerpo editorial por su dedicación y entusiasmo en la edición y publicación de este número de la revista. La calidad de los artículos publicados en *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos* (TSIA) es un reflejo directo de la entrega y profesionalismo de todos los involucrados.

Invitamos a nuestra comunidad de lectores a reflexionar sobre los desafíos y oportunidades que plantea el desarrollo de tecnologías y productos innovadores en el sector alimentario. Confiamos en que esta edición sea de gran interés y utilidad para ustedes, y los alentamos a seguir participando activamente con nosotros. Sus comentarios y sugerencias son siempre bienvenidos.

Reciban un cordial saludo,

Aurelio López Malo

Profesor investigador

Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental

UDLAP



Tratamientos con pulsos de luz de alta intensidad: sus aplicaciones en la industria de los alimentos

D. González-Albarrán*, E. Palou-García y A. López-Malo

*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos
Correo electrónico: david.gonzalezan@udlap.mx • aurelio.lopezm@udlap.mx

RESUMEN

Los pulsos de luz de alta intensidad (PLAI) son una tecnología emergente para la inactivación de microorganismos patógenos y causantes del deterioro de los alimentos. Esta tecnología surge a raíz de la demanda de los consumidores por productos con mayor valor nutricional, con una «etiqueta limpia» (al eliminar aditivos) y, en general, lo más similar posible a un producto fresco. Los tratamientos con PLAI se basan en la aplicación de pulsos de luz de amplio espectro (que incluye longitudes de onda desde el infrarrojo hasta el ultravioleta), de alta energía y corta duración.

En este artículo de revisión, se tratan los aspectos fundamentales para la comprensión de los tratamientos con PLAI, con el objetivo de facilitar el diseño y estudio de procesos utilizando esta tecnología. Se presentan sus distintas aplicaciones en la industria de alimentos y se explora la viabilidad de incorporarlos a las líneas de producción.

Palabras clave: *luz pulsada, tecnologías emergentes, tecnologías no térmicas, desinfección de alimentos.*

ABSTRACT

High intensity light pulses (HILP) are an emerging technology for the inactivation of pathogenic and spoilage microorganisms in food. This technology arises from consumer demand for products with better nutritional value, “clean label” (by eliminating food additives), and, in general, with sensory and nutritional characteristics as close as possible to those of a fresh product. Treatments with HILP are based in the application of short duration, high energy, broad-spectrum light on food. This broad-spectrum light includes wavelengths from infrared to ultraviolet.

This review paper will deal with the fundamental aspects for the comprehension of treatments with HILP with the objective to make the design and study of processes using them more accessible. Their applications in the food industry will be presented and the viability of incorporating them into manufacturing lines will be analyzed.

Keywords: *pulsed light, emerging technologies, non-thermal technologies, food safety.*

INTRODUCCIÓN

Los pulsos de luz de alta intensidad (PLAI) son una tecnología no-térmica emergente para el control de microorganismos en alimentos. La tecnología se fundamenta en la inactivación microbiana utilizando luz pulsada de amplio espectro, mediante la cual se dañan estructuras y procesos vitales de los microorganismos deterioradores y patógenos presentes en el alimento con muy poco daño a sus características sensoriales y nutritivas. El efecto microbicida de los PLAI se deriva de los efectos fototérmicos y fotoquímicos sobre las células y sus componentes, y requiere que el espectro de la luz pulsada contenga un componente importante de luz ultravioleta (uv). Entre los microorganismos contra los que se ha demostrado la efectividad de los PLAI se encuentran bacterias como *Listeria innocua*, *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli*, *Bacillus cereus* y *Salmonella enteritidis* (Agüero, Jagus, Martín-Belloso y Soliva-Fortuny, 2016; Anderson, Rowan, MacGregor, Fouracre y Farish, 2000; Can, Demirici, Puri y Gourama, 2014), mohos como *Aspergillus niger*, *Fusarium culmorum* y *Penicillium roqueforti* (Anderson *et al.*, 2000; Can *et al.*, 2014; Chaine, Levy, Lacour, Riedel y Carlin, 2012) y levaduras como *Saccharomyces cerevisiae* (Chaine *et al.*, 2012; Aguil.-Aguayo, Charles, Renard, Page y Carlin, 2013).

Esta tecnología (de manera similar a otras tecnologías emergentes) surge dada la demanda de los consumidores por alimentos «menos procesados», lo cual se ha interpretado como productos que se encuentren en el estado más cercano posible al alimento fresco cuando son comprados o consumidos por las personas. La tecnología comenzó a desarrollarse comercialmente en los años noventa del siglo pasado (Chen, Lung, Yang y Wang, 2015; Elmnasser *et al.*, 2007), pero sus aplicaciones aún son limitadas. En general, los fabricantes de sistemas de luz pulsada recomiendan utilizar la tecnología para la esterilización de empaques alimenticios y esta es la principal aplicación comercial de los PLAI en la actualidad. A pesar de esto, se han explorado otras opciones para su utilización, como su aplicación en alimentos líquidos como bebidas, agua potable, leche y jugos de frutas. Sus aplicaciones en alimentos sólidos son aún inciertas, aunque algunos estudios han explorado su uso en quesos, carnes, nueces, semillas y especias. El principal reto para la aplicación de la luz pulsada en esta clase de alimentos es que la desinfección se li-

mita a la superficie del producto. En productos cuya superficie es irregular, las irregularidades producen un efecto de «sombra», el cual protege a los microorganismos de la luz desinfectante. En ese sentido, los tratamientos con luz pulsada se comportan de manera similar a otros métodos de desinfección que sólo actúan sobre la superficie de los alimentos, como la desinfección con soluciones microbicidas.

En este contexto, el propósito de esta revisión es explorar los fundamentos tecnológicos de los tratamientos por PLAI, así como presentar sus actuales aplicaciones industriales, sus aplicaciones emergentes y perspectivas de sus aplicaciones futuras. Se explorarán también parámetros operacionales de los tratamientos y consideraciones para el diseño de estos, así como los posibles efectos no deseados sobre las características nutricionales, químicas y organolépticas de los alimentos. Finalmente, se evaluará el potencial de la tecnología como una alternativa para el tratamiento térmico u otros métodos de inactivación microbiana.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. Fundamentos de los pulsos de luz de alta intensidad

La investigación sobre el uso de pulsos luminosos de alta intensidad (PLAI), también llamados simplemente *luz pulsada* (LP), *luz blanca pulsada* o *luz pulsada de amplio espectro de alta intensidad* para la desinfección de alimentos comenzó en la década de los setenta en Japón, con la primera patente apareciendo en el año de 1984. Los derechos de dicha patente fueron comprados por la empresa PurePulse Technologies®, lo cual derivó en el primer sistema comercial para desinfección de fármacos, equipo médico, material de empaque y agua, denominado PureBright®. Sin embargo, no fue sino hasta los años noventa, cuando el proceso fue aprobado por la FDA para su uso en alimentos, que el desarrollo de aplicaciones en la industria alimentaria comenzó a acelerarse (Gómez-López, Ragaert, Debevere y Devlieghere, 2007; Heinrich, Zunabovic, Varzakas, Bergmair y Kneifel, 2016; Oms-Oliu, Martín-Belloso y Soliva-Fortuny, 2010).

En la figura 1 se puede apreciar un esquema generalizado de un sistema PLAI. El principal componente de estos sistemas

de desinfección es una lámpara de luz de amplio espectro y con alta intensidad luminosa (figura 1, d). Estas lámparas generalmente contienen xenón dentro de una cámara de cuarzo, al cual se le suministran pulsos de energía eléctrica de corta duración, pero alta energía, generando pulsos de luz con un espectro entre los 180 y los 1,100 nm de longitud de onda, el cual incluye luz en el espectro ultravioleta (uv-c, uv-A y uv-B), visible e infrarrojo (Elmnasser *et al.*, 2007). El sistema genera los pulsos de luz por medio de la combinación de un condensador (figura 1, b) y un inductor (figura 1, c). El condensador almacena energía eléctrica y posteriormente la libera de manera súbita (en solo unos pocos nanosegundos) hacia la lámpara, la cual produce en ese momento el pulso luminoso (Elmnasser *et al.*, 2007; Oms-Oliu *et al.*, 2010). El inductor permite configurar algunas características de los pulsos de luz, como su amplitud y el espectro de la luz producida (Abida, Rayees y Masoodi, 2014; Elmnasser *et al.*, 2007).

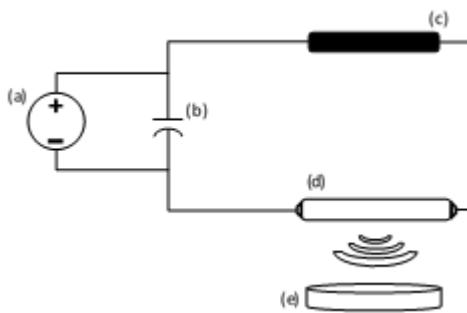


Figura 1.

Diagrama simplificado de un sistema de tratamiento con PLAI. (a) Fuente de energía de alto voltaje de corriente directa (DC), (b) condensador, (c) inductor, (d) lámpara, (e) objeto a desinfectar.

Para el tratamiento del material de empaque y alimentos se han desarrollado sistemas de desinfección tanto por lotes (*batch*) como continuos. Los sistemas por lotes por lo general consisten en una cámara en donde se puede colocar el alimento o material de empaque para que incida la luz sobre este. La cámara puede estar hecha de cristal o de acero inoxidable. Las primeras son más comúnmente utilizadas para fines de investigación, mientras que las segundas son más efectivas para la desinfección de alimentos, ya que el acero inoxidable actúa como material reflejante, permitiendo que

la luz incida sobre el alimento o material de empaque desde múltiples ángulos y no sólo desde la lámpara misma.

Los sistemas continuos por lo general logran la desinfección de materiales sólidos por medio de bandas transportadoras que permiten la incidencia de luz sobre el material. También se pueden fabricar sistemas para la desinfección de fluidos, en los que el alimento líquido fluye a través de una tubería dentro de la que se coloca la lámpara de luz pulsada. El alimento fluye alrededor de la lámpara a una velocidad determinada dependiendo de la dosis necesaria para la desinfección.

Recientemente se han comenzado a explorar algunas alternativas para la desinfección de polvos y granos por medio de sistemas PLAI. Algunos autores han experimentado con sistemas generadores de vórtices neumáticos para mejorar la efectividad en el tratamiento de polvos y semillas, sin embargo, se han encontrado con algunos contratiempos (Hwang, Cheigh y Chung, 2017, 2018). Más adelante se discutirán estos contratiempos con mayor detalle, junto con las clases de consideraciones que se deben hacer al diseñar un sistema de tratamiento con PLAI.

2. Modo de acción para la inactivación microbiana

La acción antimicrobiana de los PLAI se debe principalmente al componente ultravioleta (uv) de los pulsos luminosos. En estudios realizados por algunos autores, se logró comprobar que, si se bloquea el componente uv de la lámpara por medio de filtros, la actividad antimicrobiana se reduce significativamente. Por ejemplo, Anderson y colaboradores (2000) lograron una inactivación de 6 ciclos logarítmicos sobre *E. coli* O157:H7 por medio de PLAI. Sin embargo, utilizando lámparas modificadas para bloquear la luz uv, lograron una inactivación de tan sólo 1 ciclo logarítmico sobre la misma bacteria. Takeshita y colaboradores (2003) también mencionan que el uso de filtros para bloquear el espectro uv reduce o elimina por completo la capacidad microbicia de los PLAI.

La inactivación microbiana por medio de los PLAI actúa de manera similar a la inactivación por medio de luz uv. De acuerdo con Wuytack y colaboradores (2003), los tratamientos antimicrobianos se pueden clasificar de acuerdo con la forma en la que producen lesiones subletales en los microorganismos. Dicho autores proponen las siguientes tres clasificaciones:

1. El tratamiento daña una única estructura vital del microorganismo sin la cual no puede subsistir. En estos casos, si el tratamiento no es suficiente para matar al microorganismo, este tampoco presentará lesiones subletales, por lo que los autores los denominan tratamientos de «todo o nada». Como ejemplos de esta clase de tratamientos, los autores proponen los campos eléctricos pulsados y los tratamientos por homogeneización a alta presión.

2. El tratamiento daña una estructura vital del microorganismo, pero este cuenta con copias redundantes de dicha estructura. En estos casos, el microorganismo solo morirá si se logran destruir todas las copias de esta estructura mediante el tratamiento, de lo contrario presentará una lesión subletal.

3. El tratamiento daña múltiples estructuras vitales del microorganismo, algunas redundantes y otras únicas. En estos casos, el microorganismo morirá si se logra destruir la estructura única o todas las copias de la estructura redundante. La mayoría de los tratamientos antimicrobianos convencionales, como el tratamiento térmico y el tratamiento por alta presión, caen dentro de esta categoría.

Con base en estas clasificaciones, los autores consideran que los tratamientos con PLAI deberían clasificarse en la tercera categoría. Esto concuerda con estudios en los que se han evaluado los efectos de los PLAI sobre los microorganismos. Aguirre y colaboradores (2015) observaron que el tratamiento aplicado a *Bacillus cereus* con PLAI provoca la extensión de la fase lag y disminuye la velocidad máxima de crecimiento de las bacterias sobrevivientes al tratamiento, lo cual se debe a que los microorganismos deben reparar el daño a sus ácidos nucleicos antes de comenzar a reproducirse, al mismo tiempo que sugiere que el daño al ADN de los microorganismos se transmite a través de las generaciones. También se ha encon-

trado que los tratamientos con PLAI provocan la inducción de genes de respuesta al estrés en *Listeria monocytogenes*, los cuales también son inducidos por factores de estrés como infección por bacteriófagos, calor, estrés osmótico y presencia de etanol en altas concentraciones (Uesugi, Hsu, Worobo y Moraru, 2016). Por otro lado, Takeshita y colaboradores (2003) encontraron que los PLAI provocan la expulsión de material citoplásmico en las células de *Saccharomyces cerevisiae*, lo cual se debe a un sobrecalentamiento del interior de la célula provocado por el efecto fototérmico de los componentes visibles e infrarrojos de los PLAI (Elmnasser *et al.*, 2007). Wekhof, Trompeter y Franken (2001) observaron un efecto similar en esporas de *Aspergillus niger* tratadas con PLAI, las cuales pudieron alcanzar temperaturas internas de hasta 120 °C, suficientes para que se observara, mediante microscopía electrónica, la fusión del medio de cultivo alrededor de las esporas destruidas. Estos efectos no siempre están presentes; por ejemplo, Levy, Aubert, Lacour y Carlin (2012) no observaron diferencias entre las estructuras de las esporas de *B. subtilis* y *A. niger* antes y después de los tratamientos con PLAI.

El hecho de que los PLAI sean capaces de dañar múltiples estructuras en los microorganismos los vuelve adecuados para desinfectar alimentos contaminados con una gran variedad de bacterias, mohos, levaduras y virus. En la tabla I se presenta una recopilación de distintos estudios en los que se ha evaluado la efectividad de los PLAI sobre distintos microorganismos.

En diversos estudios se ha observado que los PLAI son efectivos para destruir bacterias, levaduras, mohos y virus, sin embargo, la efectividad de los tratamientos es afectada por la clase de microorganismo presente en la superficie. En algunos estudios se ha reportado que los mohos son más resistentes a los tratamientos con PLAI que levaduras y bacterias (Anderson *et al.*, 2000; Chaine *et al.*, 2012). En el caso de *A. niger*, por ejemplo, se cree que la mayor resistencia se debe a la presencia de pigmentos melanoides capaces de absorber las longitudes de onda más

dañinas para el ADN (Anderson *et al.*, 2000). Por otro lado, se cree que las bacterias también presentan diferencias en su susceptibilidad. Por ejemplo, las bacterias gramnegativas (como *S. enterica* y *E. coli*) parecen ser más susceptibles a los tratamientos con PLAI que las grampositivas, posiblemente debido a las diferencias en la estructura de sus paredes celulares (Ramos-Villaroel, Aron-Maftei, Martín-Belloso y Soliva-Fortuny, 2012). Estas diferencias en la resistencia no resultan evidentes cuando se comparan los diversos estudios que han tratado con distintos microorganismos, como se

puede apreciar en la tabla I. Es posible que las diferencias en la resistencia entre mohos, levaduras y bacterias se deban más a las condiciones de proceso, el tamaño del inóculo y el tipo de medio (o alimento), que a la resistencia intrínseca de los diferentes microorganismos (Ramos-Villaroel *et al.*, 2012). A pesar de esta controversia, es necesario considerar el tipo y cantidad de microorganismos que se encuentran comúnmente en el alimento a tratar cuando se está diseñando un tratamiento con PLAI, como se discutirá más adelante.

Tabla I. Estudios sobre la efectividad de tratamientos con PLAI en distintos microorganismos

| Microorganismo | Carga microbiana inicial (log UFC/g o log UFC/mL) | Sustrato | Fluencia* (J/cm ²) | Inactivación máxima (log UFC/mL o log UFC/g) | Referencia |
|---|---|--|--------------------------------|--|-------------------------------------|
| Bacterias | | | | | |
| <i>Alicyclobacillus acidoterrestris</i> ATCC 49025T | 5 a 6 | Jarabe de sacarosa (65 y 67 °Bx) | 1.86 | 3 | Chaine <i>et al.</i> , 2012 |
| <i>Bacillus cereus</i> CECT 131/ATCC 10876 | 10 | Agar nutritivo fortificado | 2.1 | 6 | Aguirre <i>et al.</i> , 2015 |
| NTCC 11145 | 10 | Agar soya triptona suplementado con extracto de levadura | - | 6 a 8 | Anderson <i>et al.</i> , 2000 |
| <i>Bacillus subtilis</i> DSM 402 | 5 a 6 | Jarabe de sacarosa (65 y 67 °Bx) | 1.86 | >4 | Chaine <i>et al.</i> , 2012 |
| | 6 a 9 | Agar Luria Bertani y medio inerte | 1.25 | 5 | Levy <i>et al.</i> , 2012 |
| <i>Escherichia coli</i> LRF 1.107 | 7 | Espinaca (<i>Spinacia oleracea</i> L. cv. Polka) (Lleida, España) | 12 | 2.3 | Agüero <i>et al.</i> , 2016 |
| | 6 | Jitomate (<i>Licopersicon esculentum</i> Mill. cv. Daniela) | 8 | >1 | Valdivia-Nájar <i>et al.</i> , 2017 |

Tabla I. Estudios sobre la efectividad de tratamientos con PLA en distintos microorganismos (continuación)

| Microorganismo | Carga microbiana inicial (log UFC/g o log UFC/mL) | Sustrato | Fluencia* (J/cm ²) | Inactivación máxima (log UFC/mL o log UFC/g) | Referencia |
|---|---|---|--------------------------------|--|--|
| <i>Escherichia coli</i> LRF 1.107 | 9.47 | Agar bilis rojo violeta, agua destilada | 0.0157 | 6.7 | Luo <i>et al.</i> , 2014 |
| | 8 | Aguacate (<i>Presea americana</i> Mil var. Hass) | 12 | 3.33 | Ramos-Villaruel, Martín-Belloso y Soliva-Fortuny, 2011 |
| ATCC 25922 | 5 a 7 | Queso Cheddar (Nueva York, EE. UU.), queso blanco americano (Illinois, EE. UU.) | <12 | >3 | Proulx <i>et al.</i> , 2015 |
| | 7 | Leche en polvo reconstituida (9.8 % s.s.), leche descremada, leche parcialmente descremada (2 % de grasa), leche entera | 8.41, 14.85, 14.85, 14.85 | 2.05, 3.36, 2.89, 2.94 | Miller, Sauer y Moraru, 2012 |
| ATCC 11229 | 6 a 7.5 | Discos de manzana (<i>Malus pumila</i> var. Granny Smith) | 221.1 | 2.25 | Gómez <i>et al.</i> , 2012 |
| DH5 α | 7 | Leche de cabra (Olmué, Chile) | 10 | 6 | Kasahara, Carrasco y Aguilar, 2015 |
| <i>E. coli</i> O157:H7 NTCC 12079 | 10 | Agar soya triptona suplementado con extracto de levadura | - | 6 | Anderson <i>et al.</i> , 2000 |
| CECT 4972 | 3 ^b | Carpacho de res (Madrid, España) | 11.9 | 1.2 | Hierro <i>et al.</i> , 2012 |
| | 8 | Fresa, mora azul | 5.9 | 1.5, 5.4 | Huang <i>et al.</i> , 2017 |
| LFMFP 463 | 7.5 | Cuchillos de cocina | 3 | 4.62 | Rajkovic <i>et al.</i> , 2010 |
| 932, 994, E0018, H1730, F4546, MDD 333 | 4 a 5 | Semillas de alfalfa | 504 | 4.80 | Sharma y Demirci, 2003 |
| <i>E. coli</i> K12 MDD 333 | 8 | Huevo cocido | 19.4 | 4.78 ^a | Macias-Rodriguez <i>et al.</i> , 2014 |
| <i>Geobacillus stearothermophilus</i> CIP 6623T | 5 a 6 | Jarabe de sacarosa (65 y 67 °Bx) | 1.86 | >4 | Chaine <i>et al.</i> , 2012 |
| <i>Listeria innocua</i> LRF 1.117 | 7 | Espinaca (<i>Spinacia oleracea</i> L. cv. Polka) (Lleida, España) | 12 | 2.6 | Agüero <i>et al.</i> , 2016 |
| NTC 11288 | 4 a 5 ^b | Queso gouda, queso manchego | 0.9 | 3, <1 | Fernández <i>et al.</i> , 2016 |
| CECT 4030 | 4 a 5 ^b | Queso gouda, queso manchego | 0.9 | 3, <1 | Fernández <i>et al.</i> , 2016 |

Tabla I. Estudios sobre la efectividad de tratamientos con PLAI en distintos microorganismos (continuación)

| Microorganismo | Carga microbiana inicial (log UFC/g o log UFC/mL) | Sustrato | Fluencia* (J/cm ²) | Inactivación máxima (log UFC/mL o log UFC/g) | Referencia |
|---|---|---|--------------------------------|--|--|
| CLIP 11262 | 6 | Jitomate (<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill. cv. Daniela) | 8 | <1 | Valdivia-Nájar <i>et al.</i> , 2017 |
| FSL C2-008 | 5 a 7 | Queso cheddar (Nueva York, EE. UU.), queso blanco americano (Illinois, EE. UU.) | 12 | 3 | Proulx <i>et al.</i> , 2015 |
| | 9 | Material de empaque | 8 | 7.2 | Ringus y Moraru, 2013 |
| ATCC 33090 | 6 a 7.5 | Discos de manzana (<i>Malus pumila</i> var. Granny Smith) | 119.4 | 1.7 | Gómez <i>et al.</i> , 2012 |
| LRF 1.17 | 8 | Aguacate (<i>Presea americana</i> Mill var. Hass) | 12 | 2.97 | Ramos-Villarroel, Martín-Beloso y Soliva-Fortuny, 2011 |
| <i>Listeria monocytogenes</i> ATCC 43256 | 8 | Queso blanco americano (Pensilvania, EE. UU.) | 152 | 3.08 | Can <i>et al.</i> , 2014 |
| KCCM 40307 | 4 | Lenguado (<i>Paralichthys olivaceus</i>), salmón (<i>Salmo salar</i>), camarón (<i>Litopenaeus vannamei</i>) (Busan, Corea) | 12.1 | 1.9, 2.1, 2.4 | Cheigh, Hwang y Chung, 2013 |
| CECT 4032, CECT 746, Scott A | 4 a 5 ^b | Salchichón, lomo curado (Madrid, España) | 11.9 | 1.81, 1.48 | Ganan <i>et al.</i> , 2013 |
| Scott A | 7 ^b | Jamón cocido, boloña (Madrid, España) | 8.4 | 1.78, 1.11 | Hierro <i>et al.</i> , 2011 |
| | 3 ^b | Carpacho de atún, carpacho de res (Madrid, España) | 11.9 | 0.7, 0.8 | Hierro <i>et al.</i> , 2012 |
| LMG 23905 | 7.5 | Cuchillos de cocina | 3 | 4.57 | Rajkovic <i>et al.</i> , 2010 |
| <i>Pseudomonas fluorescens</i> 1150 | 5 a 7 | Queso cheddar (Nueva York, EE. UU.), queso blanco americano (Illinois, EE. UU.) | <12 | >3 | Proulx <i>et al.</i> , 2015 |
| <i>Salmonella</i> spp. | 9.01 | Agar bismuto sulfito, agua destilada | 0.01547 | 6.45 | Luo <i>et al.</i> , 2014 |
| <i>Salmonella enterica</i> serovar <i>Thyphimurium</i> CECT 7159, CECT 4371, CECT 443 | 4 a 5 ^b | Salchichón, lomo curado (Madrid, España) | 11.9 | 1.48, 1.73 | Ganan <i>et al.</i> , 2013 |

Tabla I. Estudios sobre la efectividad de tratamientos con PLA1 en distintos microorganismos (continuación)

| Microorganismo | Carga microbiana inicial (log UFC/g o log UFC/mL) | Sustrato | Fluencia* (J/cm ²) | Inactivación máxima (log UFC/mL o log UFC/g) | Referencia |
|---|---|--|--------------------------------|--|------------------------------------|
| <i>Salmonella enterica</i> serovar <i>Thyphimurium</i> CECT 7159, CECT 4371, CECT 443 | 3 ^b | Carpacho de res (Madrid, España) | 11.9 | 1 | Hierro <i>et al.</i> , 2012 |
| <i>S. enterica</i> serovar <i>Enteritidis</i> NCTC 4444 | 10 | Agar soya triptona suplementado con extracto de levadura | - | 6 a 8 | Anderson <i>et al.</i> , 2000 |
| ATCC 13076 | 4.5, 6 ^c | Huevos, huevos lavados (Madrid, España) | 12 | 2.49, 1.85 | Hierro <i>et al.</i> , 2009 |
| <i>S. enterica</i> serotipo <i>Newport</i> H1275 | 8 | Fresa, mora azul | 5.9 | 2.1 a 4.2 | Huang <i>et al.</i> , 2017 |
| <i>S. enterica</i> subespecie <i>enterica</i> DSMZ 9898 | 5 a 6 | Tallarines de huevo (Udine, Italia) | 0.7 | 2.5 | Manzocco <i>et al.</i> , 2014 |
| <i>Vibrio parahaemolyticus</i> CECT 511T | 3 ^b | Carpacho de atún | 11.9 | 0.8 | Hierro <i>et al.</i> , 2012 |
| Levaduras | | | | | |
| <i>Saccharomyces cerevisiae</i> | 5 | Epidermis de jitomate (<i>Lycopersicum esculentum</i> L. var Climberly) (Entressens, Francia) | 4 | 0.9 | Aguiló-Aguayo <i>et al.</i> , 2013 |
| | 5 a 6 | Jarabe de sacarosa (65 y 67 °Bx) | 1.23 | 5.4 | Chaine <i>et al.</i> , 2012 |
| CBS 1171 | 8.4 | Medio inerte | 16.92 | <1 | Fine y Gervais, 2004 |
| IFO 2347 | 7 | Solución amortiguadora de fosfato de potasio 0.067 M | 3.5 | 7 | Takeshita <i>et al.</i> , 2003 |
| KE 162 | 6 a 7.5 | Discos de manzana (<i>Malus pumila</i> var. Granny Smith) | 221.1 | N/d | Gómez <i>et al.</i> , 2012 |
| Mohos | | | | | |
| <i>Aspergillus niger</i> IMI 11414 | 9 | Agar extracto de malta | - | 3 a 4.5 | Anderson <i>et al.</i> , 2000 |
| ATCC 9642 | 4 | Jarabe de sacarosa (65 y 67 °Bx) | 1.2 | 1.3 | Chaine <i>et al.</i> , 2012 |
| FRC A-409 | 5 | Harina de maíz (Maryland, EE. UU.) | - | 4 | Jun <i>et al.</i> , 2003 |
| DSM 1988 | 6 a 9 | Agar extracto de malta, medio inerte | 1.25 | 5 | Levy <i>et al.</i> , 2012 |
| ATCC 16404 | 3 | Material de empaque | 0.977 | <2 | Turtoi y Nicolau, 2007 |

Tabla I. Estudios sobre la efectividad de tratamientos con PLAI en distintos microorganismos (continuación)

| Microorganismo | Carga microbiana inicial (log UFC/g o log UFC/mL) | Sustrato | Fluencia* (J/cm ²) | Inactivación máxima (log UFC/mL o log UFC/g) | Referencia |
|---|---|---|--------------------------------|--|------------------------------------|
| <i>A. niger</i> var. <i>cinnamomeus</i> ATCC 1027 | 3 | Material de empaque | 0.977 | 2 | Turtoi y Nicolau, 2007 |
| <i>Aspergillus repens</i> ATCC 44409 | 3 | Material de empaque | 0.977 | <2 | Turtoi y Nicolau, 2007 |
| <i>Botrytis cinerea</i> MUCL 18864 | 5 a 6 | Agar rosa de bengala | - | 4 | Marquenie <i>et al.</i> , 2003 |
| <i>Cladosporium herbarum</i> ATCC 28987 | 3 | Material de empaque | 0.977 | 2.7 | Turtoi y Nicolau, 2007 |
| <i>Fusarium culmorum</i> IMI 113133 | 9 | Agar extracto de malta | - | 3 a 4.5 | Anderson <i>et al.</i> , 2000 |
| <i>Monilinia fructigena</i> CBS 101499 | 5 a 6 | Agar extracto de malta | - | 3 | Marquenie <i>et al.</i> , 2003 |
| <i>Penicillium roqueforti</i> ATCC 10110 | 7 | Queso blanco americano (Pensilvania, EE. UU.) | 152 | 1.32 | Can <i>et al.</i> , 2014 |
| Virus | | | | | |
| Adenovirus del grupo D | 6 ^d | Solución salina con amortiguador de fosfato | 0.23 | 4 ^d | Lamont <i>et al.</i> , 2007 |
| Norovirus murino (MNV-1). Línea celular de macrófago murino RAW 264.7 | 8.7 ^e | Fresa, mora azul | 5.9 | 0.9 ^e | Huang <i>et al.</i> , 2017 |
| Poliovirus 1a | 6 ^d | Solución salina con amortiguador de fosfato | 0.03 | 6 ^d | Lamont <i>et al.</i> , 2007 |
| Virus de Tulane (MNV-1). Línea celular de riñón de mono LLC-MK2 | 6.7 ^e | Solución salina con amortiguador de fosfato | 4.94 | >6 ^e | Huang <i>et al.</i> , 2017 |
| Microflora nativa | | | | | |
| - | 4 a 5 | Ajonjolí (<i>Sesamum indicum</i> L.) (Seúl, Corea del Sur) | 37.85 | 0.99 | Hwang, Cheigh y Chung, 2017 |
| Bacterias nativas | - | Mijo glutinoso, semillas de casia (<i>Cinnamomum cassia</i>) (China) | 54.43 | 0.66, 0.74 | Hwang, Cheigh y Chung, 2018 |
| | - | Jitomate (<i>Lycopersicum esculentum</i> L. var Climberly) (Entressens, Francia) | 4 | 0.9 | Aguiló-Aguayo <i>et al.</i> , 2013 |

Tabla I. Estudios sobre la efectividad de tratamientos con PLAI en distintos microorganismos (continuación)

| Microorganismo | Carga microbiana inicial (log UFC/g o log UFC/mL) | Sustrato | Fluencia* (J/cm ²) | Inactivación máxima (log UFC/mL o log UFC/g) | Referencia |
|---------------------------|---|--|--------------------------------|--|------------------------------------|
| Bacterias nativas | 89 ^f | Manzana (<i>Malus pumila</i> var Granny Smith) | 71.6 | 0.8 | Gomez <i>et al.</i> , 2012 |
| Mohos nativos | - | Fresa (<i>Fragaria x Ananassa</i> Duch., cv. Camarosa) | 47.8 | 42 % ^g | Duarte-Molina <i>et al.</i> , 2016 |
| | 147 ^f | Manzana (<i>Malus pumila</i> var Granny Smith) | 71.6 | 1 | Gomez <i>et al.</i> 2012 |
| Mohos y levaduras nativos | 5.34 | <i>Triticum aestivum</i> L. var Dropla (Rumania), <i>T. aestivum</i> L. var Vulgare (España) | 51.2 | 3.81 | Aron Maftei <i>et al.</i> , 2014 |

* La fluencia reportada en esta tabla es la correspondiente a la inactivación máxima alcanzada en el estudio en cuestión.

^a Expresado como el logaritmo del número más probable (log NMP) por mL.

^b Expresado como el logaritmo de las unidades formadoras de colonia (log UFC) por cm².

^c Expresado como el logaritmo de las unidades formadoras de colonia (log UFC) por unidad.

^d Expresado como el logaritmo de las unidades de cultivo de tejido infeccioso (log UCTI) por mL.

^e Expresado como el logaritmo de las unidades formadoras de placa (log UFP) por mL.

^f Expresado como unidades formadoras de colonia (UFC) por cm².

^g Expresado como la disminución en el porcentaje de incidencia de mohos superficiales tras 8 días de almacenamiento.

3. Consideraciones para el desarrollo de procesos con PLAI

Como cualquier tecnología para el tratamiento de alimentos, los PLAI tienen tanto ventajas como desventajas y condiciones en las que son más o menos efectivos. Es necesario tomar en consideración varios factores cuando se está diseñando un proceso, pues la efectividad de éste puede variar de acuerdo con el tipo de alimento con el que se está trabajando, la configuración del sistema de luz pulsada y la clase y cantidad de microorganismos que se espera encontrar. Se debe tomar en cuenta también que,

aun cuando los PLAI tienen efectos relativamente leves sobre el alimento, estos pueden ser lo suficientemente prominentes como para causar defectos de calidad.

Los principales parámetros para caracterizar un tratamiento de luz pulsada son la fluencia (J/cm²), también llamada «dosis», que se refiere a la energía recibida por la muestra de la lámpara por unidad de área, el tiempo de exposición, la amplitud del pulso, es decir, el intervalo de tiempo en el que la muestra recibe energía luminosa, la cantidad de pulsos por segundo (Hz) y la potencia máxima (W), la cual se refiere a la energía de cada

pulso dividida entre su duración. La fluencia varía en función de la distancia entre la fuente de luz y la superficie (cm), por lo que es posible ajustarla de esta manera, si no se puede cambiar la potencia suministrada a la lámpara. La determinación de la dosis luminosa es un parámetro que generalmente se obtiene de manera experimental por medio de mediciones, ya que la dosis que recibe el alimento generalmente es diferente de la intensidad luminosa obtenida directamente de la lámpara (Caminiti *et al.*, 2011a; Gómez-López *et al.*, 2007). Los principales parámetros que determinan la inactivación de microorganismos son la dosis o fluencia por pulso, el número de pulsos y la fluencia total (Artíguez y Martínez de Marañón, 2014; Cheigh, Hwang y Chung, 2013; Lasagabaster y Martínez de Marañón, 2013). Se han desarrollado modelos para la predicción de la inactivación microbiana en función de la fluencia (J/cm²).

Una ecuación que se puede utilizar para predecir la efectividad de los tratamientos con PLAI es la desarrollada por Agüero y colaboradores (2016) con base en el modelo de Weibull, el cual, de acuerdo con los autores, se ha utilizado previamente para modelar la inactivación de microorganismos por medio de tecnologías no térmicas. El modelo desarrollado por estos autores se presenta en la ecuación 1:

$$\log(N) = \log(N_0) - \left(\frac{F}{\delta}\right)^\rho$$

Ecuación 1.

Donde N es el conteo de microorganismos sobrevivientes después del tratamiento, N_0 es el conteo inicial de microorganismos en el alimento, F es la fluencia (J/cm²) aplicada en el tratamiento, δ (J/cm²) es un parámetro de escala que representa la fluencia necesaria para lograr una reducción logarítmica de los microorganismos y ρ es un parámetro de forma adimensional que representa la concavidad o convexidad de la curva.

Dos modelos adicionales han sido propuestos por Ferrairo, Alzamora y Guerrero (2013), los cuales toman en consideración la existencia de una subpoblación de microorganismos menos

vulnerables al tratamiento con PLAI (ecuaciones 2 y 3). Estos modelos pueden tener mejor o peor ajuste con los datos experimentales dependiendo de la clase de sistema y microorganismo que se está estudiando, por lo que es recomendable seleccionar el que tenga el mejor ajuste para la aplicación en particular. El primer modelo propuesto se define como:

$$\log(N) = \log(N_0) + \log(f \cdot e^{-k_{max_1} \cdot t} + (1 - f) \cdot e^{-k_{max_2} \cdot t})$$

Ecuación 2.

Donde f es la fracción de la población inicial que corresponde a la subpoblación con menor resistencia al tratamiento, $(1 - f)$ es la fracción de la población inicial que corresponde a la subpoblación con mayor resistencia al tratamiento, k_{max_1} y k_{max_2} son las velocidades de inactivación correspondientes a cada una de las subpoblaciones, respectivamente, y t es el tiempo de tratamiento. El segundo modelo propuesto se presenta en la ecuación 3:

$$\log(N) = \log(N_0) + \frac{1}{1+10^\alpha} \left[10^{-\left(\frac{t}{\theta_1}\right)^{\rho+\alpha}} + 10^{-\left(\frac{t}{\theta_2}\right)^\rho} \right]$$

Ecuación 3.

Donde ρ es un parámetro de forma, α es la proporción logarítmica entre la población menos resistente y la población más resistente ($1 - f$) y θ_1 y θ_2 representan los tiempos necesarios para la primera reducción logarítmica de cada subpoblación, respectivamente.

Algunos autores han propuesto el uso de un parámetro análogo al valor D en tratamientos térmicos, el cual se define como el incremento en la temperatura necesario para lograr una reducción logarítmica del microorganismo. En el caso de tratamientos con PLAI, esta variable podría definirse como D_{pl} y describirse como el incremento en fluencia (J/cm²) necesario para obtener una reducción logarítmica del microorganis-

mo en cuestión (Aguirre *et al.*, 2015; Turtoi y Nicolau, 2007). El uso de esta variable, o de otros términos similares, es escaso en la literatura, pero podría funcionar como una forma de estandarizar los tratamientos con PLAI. Una posible razón por la cual no se ha aceptado el uso de una variable como esta es por la amplia variación en la efectividad de los tratamientos, inclusive aplicados al mismo microorganismo, en función del tipo de alimento que se está tratando. Además, en muchas situaciones no ha sido posible alcanzar una reducción logarítmica cuando se han aplicado PLAI en sistemas distintos a los llamados sistemas modelo (ver la tabla I).

La primera consideración que se debe hacer al diseñar un proceso con PLAI es que el efecto desinfectante de la luz pulsada solo puede actuar sobre la superficie de un alimento. En casos en los que se aplica en alimentos líquidos, debe considerarse que el efecto desinfectante disminuye con el grosor de la capa del alimento que la luz debe atravesar (Artíquez, Lasagabaster y Martínez de Marañón, 2011), aunque, al igual que con tratamientos térmicos, se podría considerar la generación de turbulencia al interior del tubo como una solución para la desinfección homogénea del alimento. Se ha comprobado que, en leche en polvo reconstituida a diferentes concentraciones de sólidos solubles y leche comercial con diferentes contenidos grasos, los tratamientos en un sistema turbulento son significativamente ($p < 0.05$) más efectivos que los tratamientos en un sistema estacionario (Miller, Sauer y Moraru, 2012). Chaine y colaboradores (2012) definieron la luz transmitida al fluido en función del área de la sección transversal del tubo mediante la ecuación 4:

$$F_T = \frac{Q_e}{A}$$

Ecuación 4.

Donde F_T (J/cm^2) es la fluencia transmitida a un punto en particular del fluido, Q_e (J) es la energía luminosa emitida por la lámpara y A (cm^2) es el área de la sección transversal del tubo en donde se quiere calcular la fluencia.

Otra consideración que se debe hacer al diseñar un proceso con PLAI es la clase de alimento que se intenta desinfectar. Como se puede ver en la tabla I, los tratamientos con PLAI tienden a ser más efectivos cuando se aplican sobre superficies uniformes (como los medios de cultivo o superficies inertes) o sobre líquidos transparentes o translúcidos (como soluciones de sacarosa o soluciones amortiguadoras) que cuando se aplican sobre superficies irregulares o fluidos turbios (Hwang, Cheigh y Chung, 2015; Sauer y Moraru, 2009). Por ejemplo, Luo, Chen, Chen, Dong y Hou (2014) lograron una inactivación de *E. coli* en agar bilis rojo violeta de 6.7 ciclos logarítmicos con una fluencia de tan solo $0.0157\ J/cm^2$, mientras que Agüero y colaboradores (2016) lograron una inactivación sobre la misma bacteria de tan solo 2.3 ciclos logarítmicos con una fluencia de $12\ J/cm^2$ cuando aplicaron el tratamiento con PLAI sobre la superficie de espinacas. Hierro, Ganan, Barroso y Fernández (2012) encontraron resultados similares al aplicar PLAI sobre carpacho de salmón y res, con una inactivación máxima para *E. coli* O157:H7 de tan sólo 1.2 ciclos logarítmicos a una fluencia de $11.9\ J/cm^2$. Otro ejemplo de este efecto se puede ver en el estudio realizado por Fernández, Hospital, Arias y Hierro (2016), en el que los autores lograron una inactivación contra *L. innocua* de hasta 3 ciclos logarítmicos con $0.9\ J/cm^2$ de fluencia al aplicar PLAI sobre la superficie de queso gouda, sin embargo, no lograron más de un ciclo logarítmico cuando aplicaron PLAI con la misma fluencia sobre queso manchego. Esto se debió a que la superficie del queso gouda es lisa, mientras que la del queso manchego es rugosa. Un resultado similar fue encontrado por Huang, Ye, Cao y Chen (2017), quienes lograron una inactivación de *Salmonella enterica* de 4.2 ciclos logarítmicos en mora azul, pero tan solo 2.1 ciclos logarítmicos en fresa debido a la superficie rugosa de esta última. Como se puede ver por estos últimos ejemplos, el hecho de que los PLAI sean menos efectivos sobre superficies rugosas no necesariamente significa que no se puedan aplicar sobre alimentos sólidos.

Otra consideración que se debe hacer al implementar tratamientos con PLAI es el número inicial de microorganismos en el alimento. Resulta evidente que si se utilizan los tratamientos con PLAI para desinfectar alimentos cuya carga microbiana

inicial es baja, es posible eliminar los microorganismos objetivo en su totalidad, mientras que si la carga microbiana inicial es alta, resulta muy probable que existan sobrevivientes (Aron Maftei, Ramos-Villaroel, Nicolau, Martín-Belloso y Soliva-Fortuny, 2014). En algunos estudios en los que se ha evaluado el efecto del tamaño de inóculo inicial se ha observado que si bien la reducción aumenta conforme aumenta el tamaño del inóculo, el conteo final de microorganismos se mantiene constante sin importar el tamaño del inóculo inicial. Se cree que esto se debe a que solo los microorganismos que son expuestos directamente a la luz mueren, mientras que un número de microorganismos sobrevive debido a que los microorganismos más superficiales bloquean la luz (Oms-Oliu *et al.*, 2010; Woodling y Moraru, 2007). Esto es de particular importancia en la desinfección de alimentos sólidos. Como se ha mencionado anteriormente, en el caso de los alimentos líquidos, la turbidez del medio afecta la efectividad del tratamiento con PLAI; sin embargo, no existen aún estudios en los que se reporte el efecto que pudiera llegar a tener la turbidez generada por el contenido microbiano de un alimento líquido y si esta tiene siquiera efectos relevantes sobre la efectividad de los tratamientos con PLAI.

Adicionalmente, existen algunos pretratamientos que pueden interferir con la efectividad de los PLAI. Gómez y colaboradores (2012) encontraron que la aplicación de un pretratamiento con ácido ascórbico al alimento (manzanas en rebanadas) disminuyó la efectividad del posterior tratamiento con PLAI debido al efecto antioxidante del ácido ascórbico. Es importante recordar que el daño al ADN de los microorganismos causado por el componente ultravioleta de los PLAI se debe también a la creación de especies reactivas de oxígeno, como el peróxido de hidrógeno y el ozono.

Las reducciones en el contenido microbiano encontradas por los diversos estudios con PLAI son similares o mayores a las logradas con otros tratamientos que actúan en la superficie de los alimentos, como las soluciones desinfectantes (DeVere y Purchase, 2007; Gonzalez, Luo, Ruiz-Cruz y Mc.Evoy, 2004; Gulati, Allwood, Hedberg y Goyal, 2001). Los PLAI tienen la ventaja añadida de no contaminar la superficie del alimento con sustancias como el hipoclorito de sodio, que pueden impartir

sabores y/o aromas desagradables al alimento, además de que se pueden aplicar directamente en alimentos líquidos, a diferencia de las soluciones desinfectantes.

Finalmente, al diseñar tratamientos con PLAI se debe considerar que los PLAI pueden tener ciertos efectos perjudiciales sobre la calidad del alimento. Este es uno de los campos en los que se está desarrollando la mayor cantidad de investigación en materia de PLAI en años recientes, por lo que se discutirá con mayor detalle a continuación.

3.1. Efectos de los PLAI sobre los alimentos

A pesar de tratarse de un tratamiento relativamente leve, se ha encontrado en múltiples estudios que los PLAI pueden tener algunos efectos perjudiciales sobre la calidad de los alimentos. Al igual que los efectos antimicrobianos de los PLAI, los efectos negativos sobre los alimentos se deben principalmente al componente uv de la luz pulsada. Esta radiación provoca principalmente cambios de color en los alimentos, y estos cambios son más pronunciados en alimentos con colores oscuros (Oms-Oliu *et al.*, 2010).

3.1.1. Efectos sobre las cualidades sensoriales de los alimentos

En general, los efectos sobre las cualidades sensoriales de los alimentos tratados con PLAI son menores, comparados con procesos más tradicionales como los tratamientos térmicos. Ganan, Hierro, Hospital, Barroso y Fernández (2013) encontraron que los tratamientos con PLAI que aplicaron sobre salchichón y lomo curado de cerdo provocaron cambios en su color, aroma y sabor en las dos fluencias más altas que estudiaron (8.4 y 11.9 J/cm²). Estas diferencias se tradujeron en una ligera decoloración de los embutidos y en una calificación más negativa en sabor y aroma por un panel sensorial. Estos autores encontraron que, tanto instrumentalmente como por medio de paneles de jueces, estas diferencias sólo eran apreciables inmediatamente después del tratamiento con PLAI. Tras 15 días de almacenamiento, no se encontró una diferencia significativa ($p > 0.05$) entre los embutidos que fueron tratados con PLAI y aquellos que no lo fueron.

Decoloraciones como las observadas por Ganan y colaboradores (2013) son reportadas, de manera similar, por otros estudios. Hierro y colaboradores (2012) encontraron que al aplicar tratamientos con fluencias menores a 8.4 J/cm^2 no se provoca la pérdida de color apreciable en carpacho de res. Sin embargo, al utilizar una fluencia de 11.9 J/cm^2 , un panel sensorial fue capaz de detectar una ligera decoloración. Por otro lado, se encontró también que fluencias de 8.4 J/cm^2 o mayores provocaron cambios negativos en el aroma y sabor de este mismo producto, aunque el carpacho aún fue considerado aceptable por el panel sensorial a pesar de dichos cambios. En el mismo estudio se evaluó también carpacho de atún, el cual resultó más sensible al daño por PLAI, mostrando decoloración en tratamientos mayores a 4.2 J/cm^2 y desarrollando sabores y aromas «sulfurosos» en tratamientos desde los 8.4 J/cm^2 . En otros estudios también se han observado cambios en el color de los alimentos tras el tratamiento con PLAI. Can y colaboradores (2014) encontraron que los tratamientos con PLAI provocaron algunos cambios en el color de quesos, Agüero y colaboradores (2016) lo encontraron en espinaca, Wambura y Verghese (2011) en jamón en rebanadas, Hierro y colaboradores (2011) en productos cárnicos curados y Manzocco y colaboradores (2014) en tallarines de huevo. Los cambios en color reportados por los estudios siguen el mismo patrón de decoloración encontrado por Ganan *et al.* (2013) y Hierro *et al.* (2012).

En contraste, otros autores han reportado que los tratamientos con PLAI no afectan de manera significativa al color de los alimentos tratados. Aguiló-Aguayo y colaboradores (2013) no encontraron diferencias entre el color de jitomates tratados con PLAI y jitomates sin tratamiento; Hwang y colaboradores (2018) encontraron que los tratamientos con PLAI solo tuvieron un efecto menor sobre el color de semillas de casia y mijo; Cheigh y colaboradores (2013) no encontraron cambios de color en pescado y camarones tratados con PLAI y, finalmente, Macías-Rodríguez y colaboradores (2014) no encontraron diferencia significativa ($p > 0.05$) en el color de huevo cocido tratado con PLAI y huevo sin tratamiento. Los estudios parecen indicar que los alimentos cárnicos son más susceptibles a los cambios de color debido a tratamientos con PLAI que los alimentos de origen vegetal. Esto puede deberse a que los pig-

mentos que dan color a los productos cárnicos son degradados por la luz ultravioleta de los PLAI (Hierro *et al.*, 2012; Wambura y Verghese, 2011).

Los cambios en sabor y aroma debido a los PLAI han sido evaluados solo en unos pocos estudios. Como se mencionó anteriormente, Hierro y colaboradores (2012) encontraron que los PLAI provocaron la aparición de aromas sulfurosos en carpacho de atún. El desarrollo de esta clase de aromas ha sido reportado en otros estudios con otras clases de alimentos, como queso manchego y gouda donde, de manera similar al estudio con carpacho, se encontró que los aromas indeseables desaparecieron a lo largo del almacenamiento (Fernández *et al.*, 2016). La aparición de aromas sulfurosos podría deberse a la degradación de proteínas causada por el tratamiento con PLAI. Fernández y colaboradores (2016) realizaron una evaluación de los gases en el espacio de cabeza de los quesos tratados en su estudio y encontraron algunos derivados de la degradación de aminoácidos, como el disulfuro de dimetilo.

3.1.2. Efectos sobre las cualidades nutricionales de los alimentos

En los pocos estudios en los que se han evaluado los cambios provocados por los PLAI en las cualidades nutricionales de los alimentos tratados, se ha encontrado que los efectos son sutiles y generalmente no afectan de manera negativa las propiedades nutritivas. En algunos estudios en los que se han evaluado alimentos derivados de plantas se ha encontrado que el tratamiento con PLAI provoca un incremento en la concentración de sustancias antioxidantes, como carotenoides en jitomate y mango (Aguiló-Aguayo *et al.*, 2013; Charles, Vidal, Olive, Filgueiras y Sallanón, 2013) y compuestos fenólicos en espinaca (Agüero *et al.*, 2016). Los autores atribuyen este aumento a una respuesta de la planta al estrés oxidativo provocado por el tratamiento.

Un efecto que se ha reportado, principalmente en alimentos de origen animal, es la degradación oxidativa de lípidos. En la sección anterior se discutió sobre los efectos sensoriales de los PLAI y se determinó que estos rara vez traen consigo cambios indeseables en el sabor y aroma de los alimentos. Una de las marcas más características de la degradación de lípidos es la

aparición de aromas y sabores relacionados con la rancidez, y en las evaluaciones sensoriales de alimentos tratados con PLAI, no se ha reportado que estos sabores aparezcan de manera prominente (Fernández *et al.*, 2016; Ganan *et al.*, 2013; Hierro *et al.*, 2011; Hierro *et al.*, 2012; Manzocco *et al.*, 2014). Esto es particularmente notable en el estudio de Fernández y colaboradores (2016), quienes encontraron un aumento significativo ($p < 0.05$) en el contenido de sustancias derivadas de la degradación de lípidos en los quesos evaluados en su estudio. Se ha sugerido que la corta duración de los pulsos de luz evita la formación de una gran cantidad de esta clase de compuestos (Fine y Gervais, 2004; Hierro *et al.*, 2011). Otros autores han sugerido incluso que los pulsos de luz pueden ejercer un efecto protector sobre los lípidos durante el almacenamiento debido a la formación de compuestos antioxidantes por reacciones de parchamiento no-enzimático propiciadas por la luz UV (Manzocco *et al.*, 2014).

Desde esta perspectiva, los PLAI parecen ser un tratamiento capaz de preservar de manera casi intacta las propiedades nutritivas de los alimentos. Es necesario realizar una mayor cantidad de estudios que se enfoquen en este aspecto, pues la cantidad de información disponible y la clase de alimentos que se han estudiado aún es reducida.

4. Aplicaciones de los PLAI

De acuerdo con lo que se ha discutido hasta el momento, los PLAI presentan ciertas aplicaciones prometedoras para el tratamiento de alimentos. Se puede ver que el factor limitante más importante para su aplicación efectiva en alimentos sólidos es la textura de la superficie del alimento a tratar, pues los tratamientos más efectivos se han aplicado sobre alimentos con superficie lisa. Otro factor que se debe considerar es que el aparato de desinfección debe permitir la incidencia de luz sobre la mayor proporción posible de la superficie del alimento. A tal efecto, se han utilizado sistemas que permiten la rotación de las partículas alimentarias de tal forma que la luz incida sobre todas sus caras para incrementar significativamente la efectividad de los tratamientos con PLAI (Hwang *et al.*, 2018). Con estas consideraciones en mente, se puede ver en la tabla I que se han logrado inactivaciones de más de 1 ciclo logarítmico en frutas, hojas, semillas, productos lácteos, huevos, productos cárnicos, pescados,

mariscos y alimentos en polvo. Muchos de estos estudios se han hecho en condiciones que podrían considerarse no óptimas: a escala laboratorio, con sistemas en los que la luz incide en una sola cara del alimento y con inóculos grandes.

En alimentos líquidos, las aplicaciones de los PLAI son más evidentes. Se puede ver también en la tabla I que la efectividad de los tratamientos es mayor cuando se aplica sobre microorganismos en suspensión. En alimentos, los pulsos de luz se han aplicado efectivamente para pasteurizar leche en frío (Krishnamurthy *et al.*, 2004; Smith *et al.*, 2002), así como jugos de naranja y manzana (Pataro *et al.*, 2011). Debe de considerarse también la capacidad del fluido de absorber luz en el espectro UV, así como diseñarse el sistema de tal modo que la capa del fluido que la luz debe atravesar sea lo más delgada posible y considerar utilizar un sistema de enfriamiento para el alimento, a fin de evitar una elevación excesiva de la temperatura con los cambios sensoriales que esta conlleva (Oms-Oliu *et al.*, 2010; Pataro *et al.*, 2011).

Recientemente se han comenzado a explorar algunas alternativas para la desinfección de polvos y granos por medio de tratamientos con PLAI. En algunos estudios se ha probado la efectividad de los PLAI para desinfectar esta clase de alimentos por medio de un sistema por lotes, logrando inactivaciones de entre 3.8 y 4 ciclos logarítmicos en trigo y harina de maíz, respectivamente (Jun, Irudayaraj, Demirci y Geiser, 2003; Aron Maftei *et al.*, 2014). Otros autores han intentado desarrollar sistemas continuos para el tratamiento de semillas. Por ejemplo, Hwang y colaboradores (2017, 2018), desarrollaron un sistema de luz pulsada con un componente neumático para el transporte de semillas. Los autores esperaban que la formación de un vórtice dentro de la cámara de tratamiento ayudara en exponer a las semillas a los pulsos de luz de manera más uniforme y así lograr incrementar la efectividad del tratamiento. En estos estudios se lograron inactivaciones de hasta 0.99 ciclos logarítmicos en ajonjoli, 0.74 en semillas de casia y 0.66 en mijo. En contraste, cuando los autores utilizaron un sistema en el que las semillas eran transportadas por medio de una banda, la reducción fue mayor en el caso de las semillas de casia (2.63 log), pero no en el caso del mijo (0.55 log). En este caso, los autores se cuestionaron si la razón por la cual el sistema de transporte neumático resultó menos efectivo

(en el caso de las semillas de casia) fue que las semillas no lograron rotar sobre su propio eje mientras se encontraban dentro de dicho sistema. Siendo que la fuente de luz se encontraba en el centro de la cámara y que las semillas giraban en torno a ella debido al efecto vórtice, la efectividad del sistema se habría visto reducida si las semillas no presentaron rotación y solo una cara de la semilla fue expuesta a la luz durante el tratamiento.

Una aplicación interesante de los PLAI es la desinfección del alimento post-empaque. La utilización de empaques transparentes a la luz uv permitiría procesar alimento que ya ha sido empacado. Algunos estudios han evaluado esta posibilidad. Por ejemplo, Can y colaboradores (2014) no encontraron diferencias significativas ($p>0.05$) en la inactivación de *P. roqueforti* y *L. monocytogenes* en queso americano sin empacar y empacado en polipropileno. La mayoría de los estudios realizados sobre el tratamiento de alimentos post-empaque con PLAI apunta a que el uso de material de empaque plástico transparente no impide la desinfección del alimento; sin embargo, es posible que el empaque en material de vidrio sí lo haga (Heinrich, Zunabovic, Bergmair, Kneifel y Jäger, 2015). Can y colaboradores (2014) observaron ligeros cambios en las propiedades físicas del material de empaque después del tratamiento que sugieren que la degradación de este es posible, pero no afecta de manera importante su calidad del empaque. El hecho de que los PLAI se utilizan más comúnmente para la esterilización de material de empaque solo reafirma esta noción (Chen *et al.*, 2015).

En esta revisión se han expuesto únicamente las aplicaciones de la tecnología de PLAI por sí sola; sin embargo, existen algunos estudios en los que se ha utilizado en forma conjunta con otras tecnologías para un mayor efecto antimicrobiano (Caminiti *et al.*, 2011a; Caminiti *et al.*, 2011; Ferrario, Alzamora y Guerrero, 2015; Muñoz *et al.*, 2011; Muñoz *et al.*, 2012; Palgan *et al.*, 2011;). Por lo tanto, es importante considerar investigar la aplicación de PLAI en conjunto con otros tratamientos para la inactivación microbiana, tanto tradicionales como emergentes.

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

La tecnología de desinfección por pulsos de luz de alta intensidad aún está en su infancia. Presenta aplicaciones prometedoras en el campo de los alimentos mínimamente procesados y en los alimentos listos para consumir (RTE, por sus siglas en inglés), pero hace falta un mayor desarrollo de la tecnología y más investigaciones que vayan más allá de las pruebas *in vitro*. El diseño de sistemas y procesos para el tratamiento continuo de alimentos es un área en particular que no ha sido explorada con la profundidad necesaria. Estudios como los de Pataroy y colaboradores (2011), Hwang y colaboradores (2017, 2018) y Chaine y colaboradores (2012) muestran, tanto que los tratamientos continuos son un desarrollo viable para la tecnología de PLAI, como la falta de investigación que hay en este campo de aplicación.

En un futuro es posible que los PLAI sean un método establecido más para la desinfección de alimentos gracias a la flexibilidad con la que se pueden incorporar a procesos ya existentes o utilizarse por sí solos. Impulsar el desarrollo de esta tecnología puede significar importantes ganancias, tanto científicas como económicas, así como mejorar la calidad de los alimentos que consumimos en el día a día y ayudar a la prevención del desperdicio alimentario. Los autores esperan que esta revisión sea de utilidad para aquellos interesados en los tratamientos con PLAI.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen 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 los recursos aportados.

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.
- Agüero, V. M., Jagus, R. J., Martín-Belloso, O. y Soliva-Fortuny, R. (2016). Surface decontamination of spinach by intense pulsed light treatments: Impact on quality attributes. *Postharvest Biology and Technology*, 121, 118-125.
- Aguiló-Aguayo, I., Charles, F., Renard, C. M. G. C., Page, D. y Carlin, F. (2013). Pulsed light effects on surface decontamination, physical qualities and nutritional composition of tomato fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 86, 29-36.
- Aguirre, J. S., García de Fernando, G., Hierro, E., Hospital, X. F., Ordoñez, J. A. y Fernández, M. (2015). Estimation of the growth kinetic parameters of *Bacillus cereus* spores as affected by pulsed light treatment. *International Journal of Food Microbiology*, 202, 20-26.
- Anderson, J. G., Rowan, N. J., MacGregor, S. J., Fouracre, R. A. y Farish, O. (2000). Inactivation of Food-Borne Enteropathogenic Bacteria and Spoilage Fungi Using Pulsed-Light. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 28(1), 83-88.
- Aron Maftei, N., Ramos-Villarroel, A. Y., Nicolau, A. I., Martín-Belloso, O. y Soliva-Fortuny, R. (2014). Pulsed light inactivation of naturally occurring moulds on wheat grain. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94, 721-726.
- Artíguez, M. L., Lasagabaster, A. y Martínez de Marañón, I. (2011). Factors affecting microbial inactivation by Pulsed Light in a continuous flow-through unit for liquid products treatment. *Procedia Food Science*, 1, 786-791.
- Artíguez, M. L. y Martínez de Marañón, I. (2014). Process Parameters Affecting *Listeria innocua* Inactivation by Pulsed Light. *Food and Bioprocess Technology*, 7, 2759-2765.
- Caminiti, I. M., Noci, F., Muñoz, A., Whyte, P., Morgan, D. J., Cronin, D. A. y Lyng, J. G. (2011a). Impact of selected combinations of non-thermal processing technologies on the quality of an apple and cranberry juice blend. *Food Chemistry*, 124, 1387-1392.
- Caminiti, I. M., Palgan, I., Noci, F., Muñoz, A., Whyte, P., Cronin, D. A., ... y Lyng, J. G. (2011b). The effect of pulsed electric fields (PEF) in combination with high intensity light pulses (HILP) on *Escherichia coli* inactivation and quality attributes in apple juice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 12(2), 118-123.
- Can, F. O., Demirci, A., Puri, V. M. y Gourama, H. (2014). Decontamination of Hard Cheeses by Pulsed uv Light. *Journal of Food Protection*, 77(10), 1723-1731.
- Chaine, A., Levy, C., Lacour, B., Riedel, B. y Carlin, F. (2012) Decontamination of Sugar Syrup by Pulsed Light. *Journal of Food Protection*, 75(5), 913-917.
- Charles, F., Vidal, V., Olive, F., Filguerias, H. y Sallanon, H. (2013). Pulsed light treatment as new method to maintain physical and nutritional quality of fresh-cut mangoes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 18, 190-195.
- Chen, B. Y., Lung, H. M., Yang, B. B. y Wang, C. Y. (2015). Pulsed light sterilization of packaging materials. *Food Packaging and Shelf Life*, 5, 1-9.
- Cheigh, C. I., Hwang, H. J. y Chung, M. S. (2013). Intense pulsed light (IPL) and uv-c treatments for inactivating *Listeria monocytogenes* on solid medium and seafoods. *Food Research International*, 54, 745-752.
- DeVere, E. y Purchase, D. (2007). Effectiveness of domestic antibacterial products in decontaminating food contact surfaces. *Food Microbiology*, 24, 425-430.
- Duarte-Molina, F., Gómez, P. L., Castro, M. A. y Alzamora, S. M. (2016). Storage quality of strawberry fruit treated by pulsed light: fungal decay, water loss and mechanical properties. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 34, 267-274.
- Elmnasser, N., Guillou, S., Leroi, F., Orange, N., Bakhrouf, A. y Federighi, M. (2007). Pulsed-light system as a novel food decontamination technology: a review. *Canadian Journal of Microbiology*, 53, 813-821.
- Fernández, M., Hospital, X. F., Arias, K. y Hierro, E. (2016). Application of Pulsed Light to Sliced Cheese: Effect on *Listeria* inactivation, Sensory Quality and Volatile Profile. *Food and Bioprocess Technology*, 9(8), 1335-1344.
- Ferrairo, M., Alzamora, S. M. y Guerrero, S. (2013). Inactivation kinetics of some microorganisms in apple, melon, orange and strawberry juices by high intensity light pulses. *Journal of Food Engineering*, 118, 302-311.
- Ferrario, M., Alzamora, S. M. y Guerrero, S. (2015). Study of the inactivation of spoilage microorganisms in apple juice by pulsed light and ultrasound. *Food Microbiology*, 46, 635-642.
- Fine, F. y Gervais, P. (2004). Efficiency of Pulsed uv Light for Microbial Decontamination of Food Powders. *Journal of Food Protection*, 67(4), 787-792.
- Ganan, M., Hierro, E., Hospital, X. F., Barroso, E. y Fernández, M. (2013). Use of pulsed light to increase the safety of ready-to-eat cured meat products. *Food Control*, 32, 512-517.
- Gómez, P. L., García-Loredo, A., Nieto, A., Salvatori, D. M., Guerrero, S. y Alzamora, S. M. (2012a). Effect of pulsed light combined with an antibrowning pre-treatment on quality of fresh cut apple. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 16, 102-112.
- Gómez, P. L., Salvatori, D. M., García-Loredo, A. y Alzamora, S. M. (2012b). Pulsed Light Treatment of Cut Apple: Dose Effect on Color, Structure and Microbiological Stability. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 2311-2322.

- 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, 464-473.
- Gonzalez, R. J., Luo, Y., Ruiz-Cruz, S. y McEvoy, J. L. (2004). Efficacy of Sanitizers to Inactivate *Escherichia coli* O157:H7 on Fresh-Cut Carrot Shreds under Simulated Process Water Conditions. *Journal of Food Protection*, 67(11), 2375-2380.
- Gulati, B. R., Allwood, P. B., Hedberg, C. W. y Goyal, S. M. (2001). Efficacy of Commonly Used Disinfectants for the Inactivation of Calcivirus on Strawberry, Lettuce, and a Food-Contact Surface. *Journal of Food Protection*, 64(9), 1430-1434.
- Heinrich, V., Zunabovic, M., Bergmair, J., Kneifel, W. y Jäger, H. (2015). Post packaging application of pulsed light for microbial decontamination of solid foods: A Review. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 30, 145-156.
- Heinrich, V., Zunabovic, M., Varzakas, T., Bergmair, J. y Kneifel, W. (2016). Pulsed Light Treatment of Different Food Types with a Special Focus on Meat: A Critical Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(4), 591-613.
- Hierro, E., Barroso, E., de la Hoz, L., Ordóñez, J. A., Manzano, S. y Fernández, M. (2011). Efficacy of pulsed light for shelf-life extension and inactivation of *Listeria monocytogenes* on ready-to-eat cooked meat products. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 12, 275-281.
- Hierro, E., Ganan, M., Barroso, E. y Fernández, M. (2012). Pulsed light treatment of selected pathogens and the shelf-life extension of beef and tuna carpaccio. *International Journal of Food Microbiology*, 158, 42-48.
- Hierro, E., Manzano, S., Ordóñez, J. A., de la Hoz, L. y Fernández, M. (2009). Inactivation of *Salmonella enterica* serovar Enteritidis on shell eggs by pulsed light technology. *International Journal of Food Microbiology*, 135, 125-130.
- Huang, Y., Ye, M., Cao, X. y Chen, H. (2017). Pulsed light inactivation of murine norovirus, Tulane virus, *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* in suspension and on berry surfaces. *Food Microbiology*, 61, 1-4.
- Hwang, H. J., Cheigh, C. I. y Chung, M. S. (2015). Relationship between optical properties of beverages and microbial inactivation by intense pulsed light. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 31, 91-96.
- Hwang, H. J., Cheigh, C. I. y Chung, M. S. (2017). Construction of a pilot-scale continuous-flow intense pulsed light system and its efficacy in sterilizing sesame seeds. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 39, 1-6.
- Hwang, H. J., Cheigh, C. I. y Chung, M. S. (2018). Comparison of bactericidal effects of two types of pilot-scale intense-pulsed-light devices on cassia seeds and glutinous millet. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 49, 170-175.
- Jun, S., Irudayaraj, J., Demirci, A. y Geiser, D. (2003). Pulsed uv-light treatment of corn meal for inactivation of *Aspergillus niger* spores. *International Journal of Food Science and Technology*, 38, 883-888.
- Kasahara, I., Carrasco, V. y Aguilar, L. (2015). Inactivation of *Escherichia coli* in goat milk using pulsed ultraviolet light. *Journal of Food Engineering*, 152, 43-49.
- Krishnamurty, K., Demirci, A. e Irudayaraj, J. (2004). Inactivation of *Staphylococcus aureus* by Pulsed uv Light Sterilization. *Journal of Food Protection*, 67(5), 1027-1030.
- Lamont, Y., Rzeżutka, A., Anderson, J. G., MacGregor, S. J., Given, M. J., Deppe, C. y Cook N. (2007). Pulsed uv-light inactivation of poliovirus and adenovirus. *Letters in Applied Microbiology*, 45, 564-567.
- Lasagabaster, A. y Martínez de Marañón, I. (2013). Impact of Process Parameters on *Listeria innocua* Inactivation Kinetics by Pulsed Light Technology. *Food and Bioprocess Technology*, 6, 1828-1836.
- 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, 168-174.
- Luo, W., Chen, A., Chen, M., Dong, W. y Hou, X. (2014). Comparison of sterilization efficiency of pulsed and continuous uv light using tunable frequency uv system. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 26, 220-225.
- Macias-Rodriguez, B., Yang, W., Schneider, K. y Rock, C. (2014). Pulsed uv light as a postprocessing intervention for decontamination of hard-cooked peeled eggs. *International Journal of Food Science and Technology*, 49, 2472-2480.
- Manzocco, L., Maifreni, M., Anese, M., Munari, M., Bartolomeoli, I., Zanardi, S., ... y Nicoli, M. C. (2014). Effect of Pulsed Light on Safety and Quality of Fresh Egg Pasta. *Food and Bioprocess Technology*, 7(7), 1973-1980.
- Marquenie, D., Geeraerd A. H., Lammertyn, J., Soontjens C., Van Impe, J. F., Michiels C. W. y Nicolaï, B. M. (2003). Combinations of pulsed white light and uv-c or mild heat treatment to inactivate conidia of *Botrytis cinerea* and *Monilia fructigena*. *International Journal of Food Microbiology*, 85(1-2), 185-196.

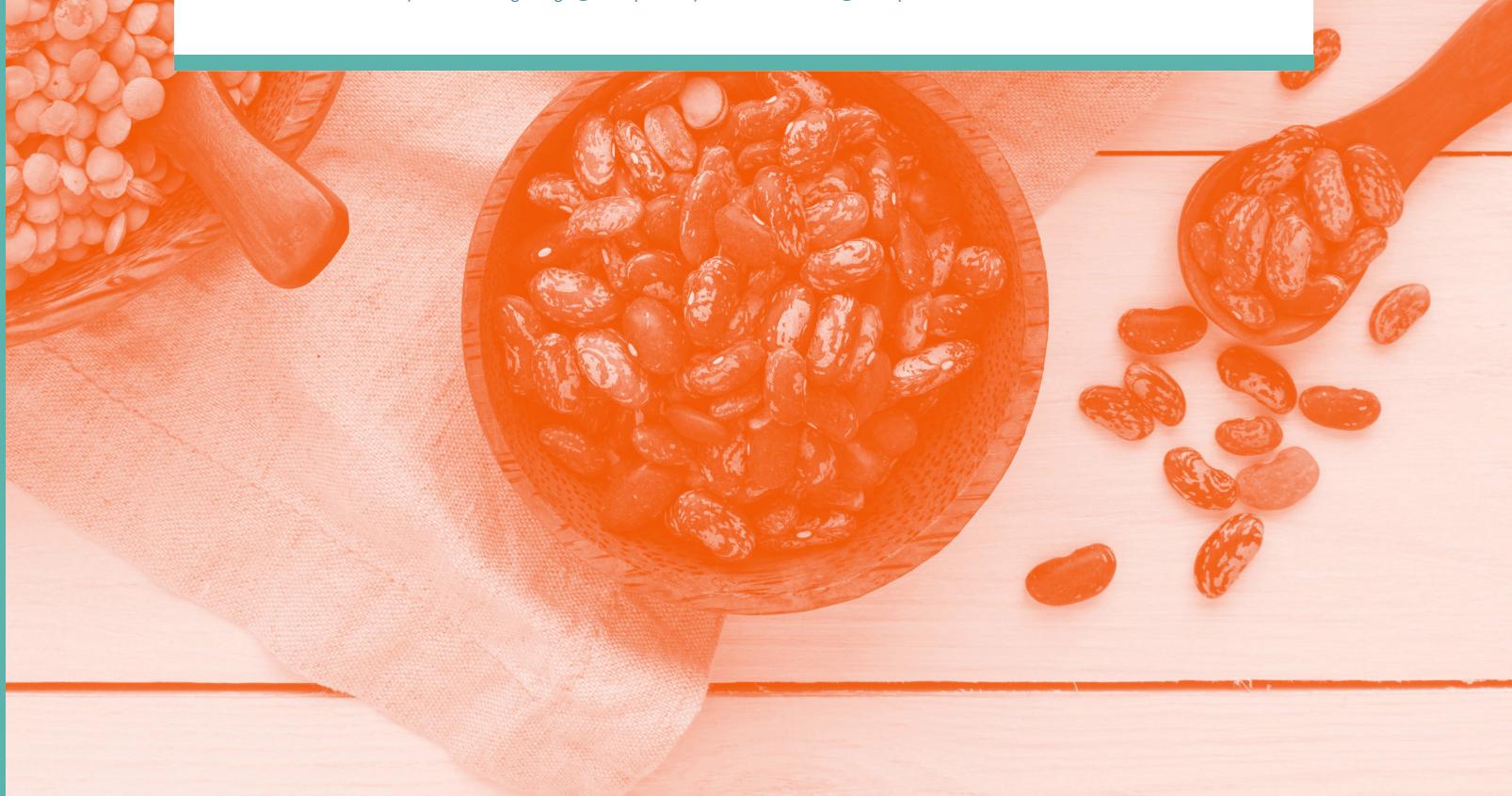
- Miller, B. M., Sauer, A. y Moraru, C. I. (2012). Inactivation of *Escherichia coli* in milk and concentrated milk using pulsed-light treatment. *Journal of Dairy Science*, 95, 5597-5603.
- Muñoz, A., Caminiti, I. M., Palgan, I., Pataro, G., Noci, F., Morgan, D. J., ... y Lyng, J. G. (2012). Effects 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.
- Muñoz, A., Palgan, I., Noci, F., Morgan, D. J., Cronin, D. A., Whyte, P. y Lyng, J. G. (2011). Combinations of High Intensity Light Pulses and Thermosonication for the Inactivation of *Escherichia coli* in Orange Juice. *Food Microbiology*, 28(6), 1200-1204.
- Martín-Belloso, O., Oms-Oliu, G. y Soliva-Fortuny, R. (2010). Pulsed Light Treatments for Food Preservation. A review. *Food and Bioprocess Technology*, 3(1), 13-23.
- Palgan, I., Caminiti, I. M., Muñoz, A., Noci, F., Whyte, P., Morgan, D. J., ... y Lyng, J. G. (2011). Combined effect of selected non-thermal technologies on *Escherichia coli* and *Pichia fermentans* inactivation in apple and cranberry juice blend and on product shelf life. *International Journal of Food Microbiology*, 151(1), 1-6.
- 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, 1642-1648.
- Proulx, J., Hsu, L. C., Miller, B. M., Sullivan, G., Paradis, K. y Moraru, C. I. (2015). Pulsed-light inactivation of pathogenic and spoilage bacteria on cheese surface. *Journal of Dairy Science*, 98, 5890-5898.
- Rajkovic, A., Tomasevic, I., Smigic, N., Uyttendaele, M., Radovanovic, R. y Devlieghere, F. (2010). Pulsed uv light as an intervention strategy against *Listeria monocytogenes* and *Escherichia coli* O157:H7 on the surface of a meat slicing knife. *Journal of Food Engineering*, 100, 446-451.
- Ramos-Villaruel, A. Y., Aron-Maftei, N., Martín-Belloso, O. y Soliva-Fortuny, R. (2012). The role of pulsed light spectral distribution in the inactivation of *Escherichia coli* and *Listeria innocua* on fresh-cut mushrooms. *Food Control*, 24, 206-213.
- Ringus, D. L. y Moraru, C. I. (2013). Pulsed Light inactivation of *Listeria innocua* on food packaging materials of different surface roughness and reflectivity. *Journal of Food Engineering*, 114, 331-337.
- Sauer, A. y Moraru, C. I. (2009). Inactivation of *Escherichia coli* ATCC 25922 and *Escherichia coli* O157:H7 in Apple Juice and Apple Cider, Using Pulsed Light Treatment. *Journal of Food Protection*, 72(5), 937-944.
- Sharma, R. R. y Demirci, A. (2003). Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 on Inoculated Alfalfa Seeds with Pulsed Ultraviolet Light and Response Surface Modeling. *Journal of Food Science*, 68(4), 1448-1453.
- Smith, W. L., Lagunas-Solar, M. C. y Cullor, J. S. (2002). Use of Pulsed Ultraviolet Laser Light for the Cold Pasteurization of Bovine Milk. *Journal of Food Protection*, 65(9), 1480-1482.
- Takeshita, K., Shibato, J., Sameshima, T., Fukunaga, S., Isobe, S., Arihara, K. e Itoh, M. (2003). Damage of yeast cells induced by pulsed light irradiation. *International Journal of Food Microbiology*, 85, 151-158.
- Turtoi, M. y Nicolau, A. (2007). Intense light pulse treatment as alternative method for mould spores destruction on paper-polyethylene packaging material. *Journal of Food Engineering*, 83, 47-53.
- Uesugi, A. R., Hsu, L. C., Worobo, R. W. y Moraru, C. I. (2016). Gene expression analysis for *Listeria monocytogenes* following exposure to pulsed light and continuous ultraviolet light treatments. *LWT - Food Science and Technology*, 68, 579-588.
- Valdivia-Nájar, C. G., Martín-Belloso, O., Giner-Seguí, J., Soliva-Fortuny, R. (2017). Modeling the Inactivation of *Listeria innocua* and *Escherichia coli* in Fresh Cut Tomato Treated with Pulsed Light. *Food and Bioprocess Technology*, 10, 166-274.
- Wambura, P. y Verghese, M. (2011). Effect of pulsed ultraviolet light on quality of sliced ham. *LWT - Food Science and Technology*, 44, 2173-2179.
- Wekhof, A., Trompeter, F. J. y Franken, O. (2001). Pulsed uv Disintegration (PUVD): a new sterilization mechanism for packaging and broad medical-hospital applications. *The First International Conference on Ultraviolet Technologies*. Washington D. C. <https://pdfs.semanticscholar.org/b2b4/c4ba5de85cd99efee776d9b71c93b6761e5.pdf>
- Wuytack, E. Y., Phuong, D. T., Aertsen, A., Reijns, K. M. F., Marquenie, D., De Ketelaere, B., ... y Michiels, C. W. (2003). Comparison of Sublethal Injury Induced in *Salmonella enterica* Serovar Typhimurium by Heat and by Different Nonthermal Treatments. *Journal of Food Protection*, 66(1), 31-37.

Proteínas vegetales:

métodos de extracción, propiedades funcionales, bioactivas y aplicaciones en alimentos

Y. I. Delgado-García* y J. I. Morales-Camacho

*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos
Correo electrónico: yolanda.delgadoga@udlap.mx • jocksan.morales@udlap.mx



RESUMEN

El uso de proteínas en la industria de alimentos, como ingrediente que mejora o aporte ciertas características sensoriales y nutricionales en los productos alimenticios, ha llevado al estudio de las propiedades tecnofuncionales y bioactivas de estos polímeros. Los métodos aplicados para producir proteínas modificadas que se pueden emplear de forma específica en ciertos productos bajo distintas condiciones de elaboración, y al mismo tiempo se aprovechen al máximo sus propiedades, también han sido explorados. Estas propiedades tecnofuncionales y bioactivas están en función de la estructura y conformación molecular de las proteínas, así como de los factores ambientales que las rodean. El objetivo de esta revisión es proporcionar información sobre las proteínas vegetales y su aplicación en alimentos, además del efecto que provocan las técnicas y condiciones de extracción e hidrólisis sobre la estructura molecular y propiedades funcionales y bioactivas de dichas proteínas.

Palabras clave: *proteínas vegetales, extracción de proteínas, hidrolizados proteínicos, propiedades funcionales, propiedades bioactivas.*

ABSTRACT

The use of proteins in the food industry as an ingredient that improves or provides certain sensory and nutritional characteristics in food products has led to the study of the techno-functional and bioactive properties of these polymers. The methods of obtaining applied to produce modified proteins that can be used specifically in certain products under different processing conditions, while at the same time taking full advantage of their properties, have also been studied. These techno-functional and bioactive properties are related to the structure and molecular conformation of the proteins, as well as the environmental factors that surround them. The objective of this review is to provide information on vegetable proteins and their application in food, in addition to the effect caused by the extraction and hydrolysis techniques and conditions on the molecular structure, functional and bioactive properties of these proteins.

Keywords: *vegetable proteins, proteins extraction, protein hydrolysates, functional properties, bioactive properties.*

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se han cultivado poco más de 6,000 especies vegetales para producir alimentos, de las cuales solo 9 especies (caña de azúcar, maíz, arroz, trigo, papas, soya, el fruto de la palma de aceite, la remolacha y la yuca) representan más del 66 % de la producción total de cultivos (FAO, 2018), dejando fuera miles de especies con posible potencial como fuente de proteína alimentaria, la cual es importante en la dieta humana cuando se habla de nutrición. Así mismo, el encontrar nuevas proteínas vegetales ricas en aminoácidos esenciales es importante para la industria de alimentos, para poder utilizarlas en la preparación de alimentos balanceados nutricionalmente, e iguales en valor nutritivo que las proteínas de fuentes animales; así como en la sustitución de ingredientes para mejorar las características sensoriales y la estabilidad de los productos alimenticios, además de lograr responder a la demanda de una mejor nutrición y elevar la seguridad alimentaria mundial. Este interés por nuevas fuentes proteínicas ha llevado a un incremento en los estudios sobre el valor nutricional y las propiedades funcionales en proteínas aisladas de cereales, leguminosas, semillas oleaginosas, entre otras especies vegetales.

La extracción de proteínas de fuentes alimenticias puede realizarse por diversos métodos, sin embargo, suelen afectar la naturaleza y cantidad de proteína extraída. Estos métodos pueden emplear calor, cambios de pH, cambios en la fuerza iónica, solventes y filtros. Dichos factores afectarán la solubilidad, la composición y las características fisicoquímicas de los extractos. Cuando se realiza una extracción de la proteína presente en un alimento, se puede obtener el total de esta o separarla en fracciones o aislados dependiendo del método utilizado. También es posible obtener proteínas modificadas, a través de técnicas como la hidrólisis, que se puede desarrollar bajo condiciones químicas o enzimáticas.

La composición, estructura y propiedades fisicoquímicas de las proteínas están interrelacionadas, pues rigen su funcionalidad y actividad biológica en diferentes sistemas. Dicha funcionalidad,

a su vez es observada en el producto final del procesado de alimentos, y la actividad biológica en los beneficios que aporta a la salud humana. Por esto, la investigación de las propiedades funcionales y bioactivas de manera individual, junto con las mediciones de las propiedades fisicoquímicas de las proteínas, permiten correlacionar cada función y bioactividad con las especies proteínicas, su estructura, su composición y condiciones ambientales.

En la presente revisión se pretende proporcionar información sobre las proteínas vegetales y su aplicación en alimentos, además del efecto que provocan las técnicas y condiciones de extracción de dichas proteínas sobre la estructura molecular y sus propiedades funcionales y bioactivas.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. Fuentes y características de las proteínas vegetales

Las proteínas vegetales son materiales útiles por ser seguras, altamente biocompatibles, nutritivas y de bajo costo, sin embargo, son deficientes en algunos aminoácidos esenciales. Las principales fuentes vegetales de proteína provienen de cereales, pseudocereales y leguminosas; aunque también ha habido investigaciones sobre otras fuentes como las especias, semillas, alfalfa y plantas comunes comestibles como las espinacas, sin embargo, las más estudiadas y usadas en la industria alimenticia son soya, garbanzo, frijol y cacahuate. Recientemente ha crecido el interés en los pseudocereales, tales como el amaranto, la quinua y el alforfón o trigo sarraceno por sus propiedades nutricionales (libres de gluten, alto contenido de proteínas y nutrientes esenciales) y funcionales. Además, estas especies tienen una gran adaptabilidad agroclimática, por lo que se han expandido a diferentes áreas geográficas (Alu'datt *et al.*, 2013; Mir, Riary y Singh, 2018; Piovesana *et al.*, 2018).

Las proteínas provenientes de fuentes vegetales se dividen en cuatro categorías: albúminas, globulinas, prolaminas y glu-

telinas, de acuerdo con su solubilidad en diferentes solventes, como agua, solución salina, alcohol y solución alcalina, respectivamente. Esta clasificación ayuda a entender las características nutricionales y funcionales de las plantas como fuente de alimento, por ejemplo, las proteínas que poseen los pseudocereales tienen un mejor balance de la composición de aminoácidos y valores biológicos más altos que los cereales. Se sabe que el trigo, como muchos otros cereales, tiene abundantes fracciones de prolaminas y glutelinas en su composición proteínica, las cuales juegan un papel tecnofuncional importante. En contraste, en la mayoría de las leguminosas, las fracciones proteínicas más abundantes en su composición son las albúminas y las globulinas; las mismas que predominan en los pseudocereales. En cuanto a la composición de aminoácidos, se puede encontrar mayores cantidades de lisina en los pseudocereales y leguminosas que en los cereales, ya que es el aminoácido limitante en estos últimos. También se encuentran proporciones superiores de aminoácidos azufrados como la metionina y cisteína en los pseudocereales, en comparación con algunas leguminosas y cereales (Chen *et al.*, 2018; Janssen *et al.*, 2017; Mir *et al.*, 2018).

2. Extracción de proteínas vegetales

Las proteínas con frecuencia se encuentran en bajas concentraciones en el material biológico crudo, por eso es necesario aplicar procesos que permitan extraerlas con un alto rendimiento y pureza, y que al mismo tiempo mantengan su función biológica. Dependiendo de la pureza que se desee obtener de la proteína, se pueden aplicar diversas técnicas de prepurificación, como la filtración, centrifugación y precipitación con sulfato de amonio y/o solventes orgánicos, y series o combinaciones de sistemas de purificación de alta resolución basados en cromatografía. Los métodos más empleados para extraer, aislar o concentrar proteína son la precipitación por calor, precipitación isoelectrónica, extracción por solubilidad (método de Osborne) y los ya mencionados anteriormente (Franco-Vega, Palou, Ramírez-Corona y López-Malo, 2017; Lee, Khoiroh, Ooi, Ling y Show, 2017).

La extracción de proteínas puede inducir cambios en la conformación y/o estructura, y en algunos casos puede desnaturalizar (parcialmente), y de este modo afectar las propiedades tecnofuncionales, como es el caso de las propiedades espumantes y de formación de geles. La secuencia de Osborne es un método que fue desarrollado para extraer fracciones de proteínas de granos y semillas de manera secuencial y en función de su solubilidad en distintos medios; de esta manera se pueden clasificar las fracciones para el estudio posterior de sus propiedades funcionales, fisicoquímicas y su estructura. A partir de este método se han realizado diversos estudios profundos que establecen la relación estructura-función para poder entender las estructuras primaria, secundaria y terciaria de las proteínas y sus fracciones. Por otro lado, las propiedades tecnofuncionales de cualquier tipo de proteína pueden mejorarse con la aplicación de tratamientos enzimáticos, calentamiento moderado o fosforilación, o mediante la hidrólisis enzimática con proteasas para modificar las propiedades funcionales y bioactivas de las proteínas o sus fracciones (Janssen *et al.*, 2017).

2.1. Aislados proteínicos

Las proteínas son macronutrientes compuestos por aminoácidos y son necesarias para el crecimiento y función del cuerpo humano, y en general de los seres vivos. Las proteínas en sus fuentes naturales normalmente están acompañadas de otros componentes. En la obtención de aislados proteínicos se busca eliminar o disminuir los componentes no proteínicos para conseguir un producto final con la concentración más alta de proteínas posible, esta característica es la que diferencia a los aislados de otros productos proteínicos como las harinas y concentrados. Los aislados proteínicos tienen ciertas características que mejoran las propiedades sensoriales (color y sabor) y funcionales, por esta razón son utilizados como ingredientes en bebidas, productos texturizados o alimentos especializados. Sin embargo, para la obtención de los aislados de proteína de fuentes biológicas pueden utilizarse diversas técnicas (Adenekan, Fadimu, Odunmbaku y Oke, 2018; Damodaran y Parkin, 2017; Garba y Kaur, 2014).

2.1.1. Tratamientos de obtención

Existen varios métodos de extracción de proteínas para diferentes fuentes vegetales, entre estos métodos se incluyen factores como el pH, la temperatura, el tiempo de extracción y la proporción sólido/líquido que pueden afectar el rendimiento de extracción. Sin embargo, una buena técnica de obtención de los aislados asegura una proteína altamente purificada. Dentro de los tratamientos que se aplican para la obtención de proteínas se encuentra la precipitación alcalina isoelectrónica, que es el método comúnmente aplicado en la industria de extracción de proteínas. También se pueden obtener aislados por precipitación con metanol, extracción con agua, extracción con sulfato de amonio, precipitación con acetona, precipitación salina, termocoagulación, ultrafiltración o tratamientos con altas presiones, entre otros. Las altas presiones se aplican, en general, para formar estructuras entre las proteínas, modificando así su composición nutricional o sabor. Su aplicación sobre las proteínas lleva al rompimiento de los enlaces hidrofóbicos e interacciones electrostáticas, provocando por lo tanto cambios en su conformación. El grado de modificación que puede sufrir una proteína en alguna de sus propiedades depende tanto del tratamiento de altas presiones aplicado, como del tipo de proteína, pH y fuerza iónica de esta (Adenekan *et al.*, 2018; Damodaran y Parkin, 2017; Deng *et al.*, 2014; Yin, Tang, Wen, Yang y Li, 2008; Janssen *et al.*, 2017).

La aplicación de tratamientos o pretratamientos en la obtención de aislados proteínicos, en los que se hacen cambios bruscos del pH pueden mejorar algunas propiedades como la formación y estabilidad de espumas, ya que se reduce la tensión en la interfase al desdoblarse parcialmente las proteínas (Janssen *et al.*, 2017).

2.1.2. Efectos en la estructura y conformación de las proteínas

La aplicación de calor en la extracción de proteínas puede afectar sus propiedades funcionales y de conformación, por ejemplo, en el caso de proteínas de amaranto en condiciones alcalinas

y tratadas a 90 °C, la solubilidad disminuye porque la fracción de globulinas sufre agregación; a 70 °C la hidrofobicidad de la superficie disminuye; a 50 °C hay desdoblamiento parcial de la proteína porque se forman agregados de alto peso molecular. Estos cambios también son influenciados por el pH, pues a pH 9.0 la proteína es más sensible al calor que a pH 11.0. En la proteína 11S globulina de la quinua también se observa que el efecto del tratamiento térmico (100 °C) depende del pH, pues a pH 8.5 o 10.5 hay rompimiento de los enlaces disulfuro que conectan las subunidades ácidas con las básicas; mientras que a pH 6.5 los enlaces covalentes permanecen intactos. Sin embargo, en cualquier valor de pH hay incremento en la hidrofobicidad de la superficie de la proteína. Los cambios en las propiedades de la superficie que ocurren durante el tratamiento térmico en condiciones alcalinas pueden deberse a la desamidación de los residuos de glutamina y asparagina, o al incremento del contenido de los grupos SH libres que se generan (Janssen *et al.*, 2017).

El uso de altas presiones para la obtención de estructuras entre proteínas provoca una reducción del número de enlaces no covalentes, dando como resultado una proteína desdoblada parcialmente, esto se produce con el propósito de incrementar los niveles de grupos sulfhidrilo de los residuos de cisteína, para que estén más accesibles a las reacciones de intercambio entre dichos grupos y, por lo tanto, se formen las estructuras. Por otro lado, se ha visto que en las proteínas extraídas de alforfón aplicando tratamientos de inflado, la hidrofobicidad de la superficie se reduce (Janssen *et al.*, 2017).

2.2. Hidrolizados proteínicos

Los hidrolizados proteínicos son péptidos de diferentes tamaños y aminoácidos libres obtenidos de la extracción de una proteína al sufrir un ataque nucleofílico de una molécula de agua sobre el enlace peptídico, entre los grupos amino y el carboxilo del aminoácido adyacente, catalizado por una peptidasa, provocando el rompimiento (hidrólisis) del enlace peptídico. Los hidrolizados pueden clasificarse en tres grupos según su aplicación determinada por el grado de hidrólisis, es decir, por el porcen-

taje de enlaces peptídicos rotos: hidrolizados con alto grado de hidrólisis, usados generalmente como suplementos nutricionales y en dietas médicas especiales; hidrolizados con varios grados de hidrólisis, empleados como saborizantes; e hidrolizados con bajo grado de hidrólisis y características funcionales mejoradas (Karami y Akbari-adergani, 2019; Wouters, Rombouts, Fierens, Brijs y Delcour, 2016).

2.2.1. Tratamientos de obtención

La hidrólisis de proteínas es una herramienta que se utiliza para modificar las propiedades funcionales, nutricionales y bioactivas de las proteínas nativas, la cual puede realizarse mediante procesos enzimáticos o químicos. En estos últimos se incluyen la hidrólisis ácida y la alcalina que tienen la desventaja de ser difíciles de controlar en comparación con la enzimática, ya que se desarrolla en condiciones menos extremas de pH y temperatura, evitando así la pérdida del valor nutricional de la proteína. Una desventaja que presenta el tratamiento con enzimas es que no son capaces de hidrolizarlas totalmente, pues van perdiendo su actividad. Las proteínas pueden ser susceptibles a la hidrólisis enzimática con proteasas digestivas debido a factores como su solubilidad, complejidad estructural y composición de aminoácidos; y en el caso de las vegetales, también por la presencia de inhibidores de proteasas específicos. También se puede realizar una hidrólisis limitada al obtener un grado de hidrólisis bajo, menor al 20 %; como pretratamiento para mejorar la capacidad de formar espumas y emulsiones de los hidrolizados (Agyei, Ongkudon, Wei, Chan y Danquah, 2016; Janssen *et al.*, 2017; Sáenz de Rodrígáñez, Medina, Moyano y Alarcón, 2011; Tavano, 2013).

El proceso de hidrólisis de las proteínas se lleva a cabo bajo ciertas condiciones físicas, como la aplicación de calor. Las variaciones en las condiciones de hidrólisis pueden mejorar el método tradicional de la solución de digestión; también se pueden aplicar métodos alternativos para la obtención de hidrolizados, un ejemplo de esto son las altas presiones hidrostáticas, que pueden aumentar los rendimientos y reducir los costos y tiempos de reacción. Otros métodos físicos de interés reciente son los

tratamientos con radiación, campos de pulsos eléctricos y ultrasonido (Kuan, Bhat, Patras y Karim, 2013; Piovesana *et al.*, 2018; Tiengo, Faria y Netto, 2009).

Dentro de las condiciones químicas que se necesitan para la obtención de los hidrolizados proteínicos, está el ajuste o modificación del pH, que es el factor principal que influye en el proceso, ya que puede alterar del grado de hidrólisis; como se observó en hidrolizados de quinua que tuvieron un bajo grado de hidrólisis a pH alcalino (Janssen *et al.*, 2017; Tiengo *et al.*, 2009). Algunos métodos de extracción semiindustriales que se han utilizado para obtener fracciones proteínicas se basan en el uso de detergentes como el SDS y condiciones alcalinas para la posterior digestión *in vitro* con enzimas como la alcalasa (Montone *et al.*, 2018).

Las condiciones biológicas que se pueden aplicar en el proceso de hidrólisis son las requeridas para simular la digestión gastrointestinal o para la proteólisis con enzimas de plantas o microorganismos. En el caso de la proteólisis gastrointestinal, se utiliza una o la combinación de enzimas digestivas como pepsina, tripsina, quimotripsina y pancreatina para degradar las proteínas de alimentos; por ejemplo, para la pepsina normalmente se lleva a cabo en soluciones con un pH de 2.5 a 37 °C y con un tiempo de reacción de entre 2 y 12 horas. También pueden obtenerse hidrolizados a partir de la fermentación con microorganismos proteolíticos, por ejemplo, el *Lactobacillus plantarum* que ha sido utilizado para fermentar frijoles y obtener péptidos bioactivos. Sin embargo, la hidrólisis enzimática tiene más ventajas que la fermentación en la obtención de péptidos bioactivos, ya que es más rápida y puede controlarse; además, los parámetros se pueden optimizar para que siempre se obtenga la misma composición de péptidos y perfiles de pesos moleculares. La hidrólisis enzimática es el proceso más adecuado para la producción de péptidos con una funcionalidad específica (Agyei *et al.*, 2016; Montone *et al.*, 2018; Piovesana *et al.*, 2018; Tiengo *et al.*, 2009).

En el proceso de hidrólisis enzimática, la elección de la enzima es fundamental cuando se desea obtener péptidos

bioactivos, pues esta puede alterar la actividad biológica de los péptidos. Existen enzimas que pueden ser específicas o no al sitio activo, por lo que las enzimas utilizadas son diferentes para la hidrólisis de distintas proteínas o para la obtención de hidrolizados con características y propiedades funcionales determinadas. También se pueden utilizar enzimas menos específicas, pero tienen la desventaja de que se pierde la información precisa de los péptidos obtenidos que se podría conseguir con el uso de las enzimas específicas. Un ejemplo es el uso de la alcalasa, una enzima poco específica, pero en la hidrólisis de proteínas de soya, salvado de arroz y papa, los resultados del grado de hidrólisis han demostrado ser superiores respecto a otras enzimas probadas. No obstante, se ha visto que los hidrolizados producidos por tripsina tienen una actividad antioxidante más alta que los producidos por proteasas neutras o alcalinas (Piovesana *et al.*, 2018).

2.2.2. Efectos en la estructura y conformación de las proteínas

La hidrólisis de proteínas provoca la reducción del peso molecular, el incremento de los grupos ionizables en el medio (por la liberación proporcional de un gran número de grupos terminales de cadenas proteínicas, al número de enlaces peptídicos hidrolizados) y la exposición de grupos hidrofóbicos del centro de la proteína, que producen diferentes alteraciones en las interacciones ambientales de esta. Estos cambios dependen tanto de las condiciones ambientales como de las condiciones de la hidrólisis (especialmente la proteasa utilizada y el grado de hidrólisis desarrollado). El resultado de la hidrólisis es la transformación de las proteínas en un extracto de péptidos que contiene diferentes porcentajes de péptidos de diversas dimensiones, aminoácidos libres y moléculas intactas de la proteína nativa. Dependiendo del pH del medio, los grupos amino terminal y carboxilos liberados pueden estar en su forma protonada o disociada, lo que produce una alteración en las interacciones de la proteína con el medio, llegando incluso a cambiar el pH global del alimento. Las condiciones de la hidrólisis deben ser las adecuadas para que la funcionalidad de la proteína no se pierda, por ejemplo, cuando se aplica la hidrólisis enzimática limitada para optimizar la formación de espumas, se favorece la migración de proteínas en la interfase aire/agua y las hace más flexibles,

mejorando así los reordenamientos conformacionales en la interfase. La hidrólisis de las proteínas no solo afecta su estructura y conformación, sino también las propiedades de la matriz del alimento. Cuando se utilizan enzimas pueden observarse efectos positivos como la modificación de la calidad sensorial (como textura y sabor), el mejoramiento de la digestibilidad, la reducción del efecto alergizante o la liberación de los péptidos bioactivos. Por otro lado, el uso de la hidrólisis ácida puede llevar a la pérdida de componentes de las proteínas y/o generar compuestos con efectos nocivos a la salud humana. Igualmente, un protocolo de hidrólisis mal diseñado puede producir efectos sensoriales desagradables como la acumulación de péptidos con sabor amargo (Janssen *et al.*, 2017; Tavano, 2013; Tavano, Berenguer-Murcia, Secundo y Fernandez-Lafuente, 2018).

3. Propiedades tecnofuncionales de las proteínas

La utilización de proteínas en sistemas alimentarios depende de las propiedades fisicoquímicas y tecnofuncionales que posean, estas últimas corresponden a las funciones no nutricionales que determinan el desempeño/funcionamiento de las proteínas en una matriz alimentaria, tales como la solubilidad, la coagulación por calor, la estabilidad térmica, la actividad emulsionante, la capacidad de formar espumas y su estabilidad, y la formación de geles. Estas características tecnofuncionales vienen del equilibrio entre la estructura tridimensional nativa de la proteína y las continuas transiciones de su conformación estructural, dicho equilibrio conformacional se acopla regularmente a alteraciones en la estructura secundaria o terciaria de la proteína, y con su relación superficie-actividad. Sin embargo, las propiedades tecnofuncionales de las proteínas extraídas de alimentos pueden ser afectadas por las condiciones específicas de extracción, ya que pueden desencadenar cambios en la conformación de la proteína. En la tabla I se muestran algunos ejemplos de las propiedades tecnofuncionales que más destacan de los aislados o hidrolizados proteínicos obtenidos de distintas fuentes vegetales, aplicando diversos métodos de extracción (Tavano *et al.*, 2018; Janssen *et al.*, 2017; Carrazco-Peña *et al.*, 2013).

3.1. Solubilidad

La solubilidad de una proteína es determinada por interacciones electrostáticas e hidrofílicas, y puede mejorarse después de

Tabla I. Propiedades tecnofuncionales de proteínas de diversas fuentes vegetales extraídas por diferentes técnicas

| Técnica de extracción | Propiedad(es) tecnofuncional(es) | Fuente vegetal | Referencia |
|--|---|--|---|
| Precipitación isoelectrónica | Absorción de agua, solubilidad en agua, actividad espumante | Soya y maíz | Soria-Hernández, Serna-Saldívar y Chuck-Hernández, 2015 |
| | Solubilidad en agua, espumante | Soya verde | Brishiti <i>et al.</i> , 2017 |
| | Solubilidad en agua y emulsionante | Semillas de kiwi | Deng <i>et al.</i> , 2014 |
| | Solubilidad | Semillas de calabaza | Bucko, Katona, Popovic, Vastag y Petrovic, 2016 |
| | Absorción de agua y aceite | Ajonjoli | Olasunkanmi, Omolayo y Olusegun, 2017 |
| Precipitación isoelectrónica y tratamiento térmico | Estabilización de emulsiones | Chícharos | Peng <i>et al.</i> , 2015 |
| Precipitación alcalina | Absorción de agua, estabilizante de emulsiones | Chía | López <i>et al.</i> , 2018 |
| Precipitación alcalina y extracción salina | Emulsionante y estabilizante de emulsiones | Semillas de tomate | Sakar, Kamaruddin, Bentley y Wang, 2016 |
| Extracción salina | Formación y estabilidad de espumas | Semillas de flor de Jamaica (<i>Hibiscus sabdariffa</i>) | Mahgoub-Salah y Elbashir-Hayat, 2009 |
| Precipitación alcalina con ultrasonido | Solubilidad y emulsionante | Semillas de uva | Zhou, Zhang, Liu y Zhao, 2011 |
| | Retención de agua y aceite, emulsionante | Frijol del Ganxet | Lafarga, Álvarez, Bobo y Aguiló-Aguayo, 2018 |
| Ultrasonido | Solubilidad, emulsionante y espumante | Semillas de Girasol | Malik, Sharma y Saini, 2017 |
| | Solubilidad, emulsionante, espumante y fuerza del gel | Semillas de ciruela | Xue <i>et al.</i> , 2018 |
| | Emulsionante y solubilidad | Soya, chícharo y arroz | O'Sullivan, Murray, Flynn y Norton, 2016 |
| Altas presiones hidrostáticas | Solubilidad | Frijoles | Yin <i>et al.</i> , 2008 |
| | Emulsionante | Soya | Manassero, Beaumal, Vaudagna, Speroni y Anton, 2018 |
| | | Camote | Khan, Mu, Sun, Zhang y Chen, 2015 |
| | Emulsionante y espumante | Chícharo | Chao, Jung y Aluko, 2018 |

aplicar un proceso de hidrólisis, pero la mejora será proporcional al incremento de los nuevos grupos terminales amino y carboxilo producidos por la ruptura de los enlaces peptídicos. Esta propiedad puede servir de guía para la funcionalidad general de una proteína, debido a que se relaciona directamente con otras propiedades funcionales como la emulsionante y espumante en aislados proteínicos. Una de las características intrínsecas de las proteínas que puede influir en estas propiedades es la carga de su superficie, la cual se ve afectada por el pH del medio. Así, a valores de pH arriba o debajo del punto isoeléctrico, la carga de las proteínas puede ser positiva o negativa, lo que favorece las repulsiones electrostáticas que llevan a un incremento en la solubilidad de las proteínas. Estudios reportan que la solubilidad de las proteínas de amaranto se reduce cuando son obtenidas en condiciones de fuerzas iónicas altas, pH alcalino y temperatura ambiente; aunque en general, la solubilidad de las proteínas de los pseudocereales es pobre en pH ácido, pero a pH alcalino alcanzan porcentajes de solubilidad de 50 hasta el 100 %. Algunas tecnologías como el ultrasonido (tabla I) pueden mejorar la solubilidad de proteínas poco solubles, como la de soya, chícharo y semillas de girasol (Chen *et al.*, 2018; Damodaran y Parkin, 2017; Janssen *et al.*, 2017; Shevkani Singh, Rana y Kaur, 2014).

3.2. Formación de geles

Las proteínas globulares tienden a formar geles en estructuras de red después de aplicar calor por arriba de la temperatura mínima de desdoblamiento de la proteína. Este fenómeno se ha visto en la globulina 11S del amaranto, en la cual se produce un incremento en los niveles de hidrofobicidad en su superficie, disminuyendo así su solubilidad y formando geles (Carrazco-Peña *et al.*, 2013). Los geles pueden formarse con una estructura ordenada si hay altas concentraciones de proteína. El peso molecular de las proteínas también interviene en las características de los geles formados, como la elasticidad, dureza, fracturabilidad y cohesividad. La estabilidad de los geles se debe a los puentes disulfuro formados del intercambio de grupos sulfhidrilo/disulfuro de las reacciones de desnaturización de las globulinas

y albúminas. Los enlaces no covalentes (puentes de hidrógeno e interacciones hidrofóbicas principalmente) también participan en la estabilización de los geles, pero en menor grado que los puentes disulfuro (Janssen *et al.*, 2017; Shevkani *et al.*, 2014).

3.3. Formación de emulsiones

La capacidad emulsionante es una de las propiedades funcionales más importantes que afecta la aplicación de las proteínas en la formulación de alimentos y, como se mencionó anteriormente, la carga de la proteína influye en esta propiedad, de manera que cuando la carga es nula, el péptido o proteína no puede moverse a la interfase, por eso deben permanecer fuera de su punto isoeléctrico. En la formación y estabilidad de espumas, las proteínas actúan en la interfase como agentes activos de la superficie, gracias a su baja tensión y a que forman una película continua y altamente viscosa por medio de complejas interacciones moleculares. Además, de la misma manera que en la solubilidad y la formación de emulsiones, la carga de la proteína en determinado pH puede alterar la capacidad y estabilidad de las espumas formadas. El efecto del pH se ha observado con las proteínas de amaranto, en las que la actividad emulsionante es baja, cerca del punto isoeléctrico; asimismo, hay mejor espumado y estabilidad de las espumas a pH 2.0 que a pH 8.0, debido a que las proteínas en pH ácido presentan rápida difusión y/o adsorción en la interfase aire/agua, y a que la película que forman es más viscoelástica y flexible. No obstante, la formación de emulsiones puede mejorarse si se aplica un pretratamiento térmico, para generar una desnaturización parcial de las globulinas que llevará a la exposición de los grupos hidrofóbicos. El uso de ultrasonido también puede mejorar la capacidad emulsionante y la estabilidad de las emulsiones de algunas proteínas (tabla I) como la de chícharo y semillas de girasol, pues baja la tensión de la interfase. De igual manera, la aplicación de altas presiones hidrostáticas mejora las propiedades emulsionantes de las proteínas de camote, chícharo y soya para poder emplearlas en la industria (Chen *et al.*, 2018; Damodaran y Parkin, 2017; Janssen *et al.*, 2017; Shevkani *et al.*, 2014).

3.4. Aplicaciones en alimentos

Las aplicaciones de los aislados de proteínas vegetales en la formulación de alimentos como sustitutos de otros ingredientes pueden ayudar a mejorar sus características sensoriales, aunque esto no siempre es así, y se debe a que no poseen las mismas propiedades funcionales o no en el mismo nivel de funcionalidad, por ejemplo, el uso de la harina de pseudocereales como sustituto parcial de la de trigo para elaborar pan provoca que se debilite la fuerza de la red viscoelástica del gluten y la capacidad de atrapar gas. Sin embargo, la combinación de pseudocereales con arroz o almidón de papa para elaborar panes libres de gluten mejora el volumen específico del pan y la suavidad de la miga. El gluten de trigo también tiene la habilidad única de dar fuerza y viscoelasticidad a la masa de pastas y fideos; estas propiedades dan los atributos de apariencia, textura y calidad en la cocción característicos de las pastas; no obstante, es un reto lograr incorporar harinas de otras fuentes vegetales, y que las características y propiedades sensoriales de los productos finales sigan siendo iguales a la formulación original. En algunos estudios se probaron diferentes formulaciones de pastas, y se observó que, al fortificar la pasta con proteína aislada de alforfón, su calidad fue limitada, debido a la fracción proteínica insoluble en agua de la proteína añadida. Además, en pastas libres de gluten a partir de pseudocereales, se obtuvieron productos con menos firmeza y requerían tiempos de cocción más cortos que las pastas de trigo. Cuando se incluyó amaranto en la formulación de pasta a partir de arroz, el resultado fue el incremento en la solubilidad de la proteína, pero no hubo pérdidas durante la cocción. También se observaron efectos positivos en la firmeza de pastas extruidas a partir de amaranto y enriquecidas con arroz (Janssen *et al.*, 2017; Martínez, Ribotta, Añón y León, 2014).

Gracias a la capacidad de absorción de agua y aceite de las proteínas, los aislados proteínicos de diversas fuentes como soya o amaranto pueden utilizarse para la elaboración de salsas, sopas, masas, natillas y productos horneados para retener y mejorar los sabores, además de aportar cuerpo, espesamiento y viscosidad (Shevkani *et al.*, 2014). Los hidrolizados de soya y

maíz que tienen altos índices de solubilidad de agua y nitrógeno pueden ser utilizados en la elaboración de bebidas; los hidrolizados de soya con altos índices de absorción de agua funcionan bien como extensores para salchichas y embutidos; la harina de chícharo es buena opción como emulsionante para aderezos y otras formulaciones con alto contenido de grasa por su capacidad espumante y emulsionante (Soria-Hernández *et al.*, 2015). La proteína aislada de chía en condiciones alcalinas puede aplicarse como extensor o sustituto de carne en productos cárnicos o salchichas tipo emulsión por sus propiedades emulsionantes y su capacidad de absorción de agua y aceite (López *et al.*, 2018). Los aislados proteínicos de chícharo y arroz utilizados como extensores cárnicos en la elaboración de nuggets de pollo aumentaron el contenido de proteína y la capacidad de retención de agua del producto, también redujeron las pérdidas por cocción (Shoaib, Sahar, Sameen, Saleem y Tahir, 2018). Las proteínas aisladas de semillas de ciruela presentan buenas propiedades de formación de geles y emulsiones, por lo que resultan útiles en la elaboración de salchichas (Xue *et al.*, 2018). Las características físicas de la soya verde texturizada son muy similares a las de la soya comercial texturizada, por lo que funciona como su sustituto en este tipo de producto (Brishiti *et al.*, 2017).

4. Propiedades bioactivas de las proteínas

Las proteínas provenientes de plantas pueden mostrar propiedades protectoras de la salud porque participan en funciones fisiológicas y biológicas. Regularmente, las secuencias de aminoácidos están inactivas dentro de la proteína, pero al ser liberadas por hidrólisis, la bioactividad aparece. En los últimos años se ha mantenido una especial atención por los péptidos bioactivos, los cuales son fragmentos de proteínas compuestos por una cadena de 2 a 20 aminoácidos que tienen un efecto benéfico o influencia en funciones fisiológicas, como el tránsito intestinal, la absorción de nutrientes y efectos inmuno-modulatorios. Hay gran interés en la aplicación de péptidos bioactivos como auxiliares en tratamientos para enfermedades y padecimientos

como el cáncer, la diabetes y desórdenes inflamatorios (Algar y Mabesa, 2015; Piovesana *et al.*, 2018; Tiengo *et al.*, 2009).

Entre las bioactividades más importantes que han presentado los péptidos, están la antiproliferativa, antitumoral o anticancerígena, en las que los péptidos perturban sin especificidad la membrana de la célula cancerosa; la antimutagénica protege a las células de los agentes químicos que puedan dañarla genéticamente; la antiinflamatoria se observa mediante el bloqueo de los mediadores de inflamación en el organismo; la antimicrobiana puede funcionar como barrera de defensa contra hongos y bacterias; como opioide se presenta al inducir un efecto analgésico; la habilidad para unir metales como calcio, hierro, cobre y zinc se muestra al incrementar la solubilidad de estos; la actividad antioxidant se puede observar por mecanismos como atrapar radicales libres, donar electrones y/o unir metales; la antitrombótica se exhibe como anticoagulante o antiplaquetaria; la hipercolesterolemica que se asocia con la regulación de los niveles de colesterol a través de la reducción de la aciltransferasa colesterol coenzima A, entre otras. En la tabla II se muestran algunos ejemplos de las propiedades bioactivas mencionadas, que se presentan en los hidrolizados proteínicos obtenidos de distintas fuentes vegetales, aplicando diversos métodos de extracción (Hajfathalian, Ghelichi, García-Moreno, Sorensen y Jacobsen, 2018; Piovesana *et al.*, 2018; Tiengo *et al.*, 2009).

Estos efectos benéficos a la salud se han estudiado poco en péptidos derivados de proteínas de subproductos de frutas y vegetales. Sin embargo, las plantas pueden proveer una amplia variedad de compuestos bioactivos, por lo tanto, ofrecen grandes expectativas para el estudio de péptidos bioactivos. Algunas de las propiedades bioactivas que más han sido estudiadas, en relación con las propiedades estructurales de las proteínas y los péptidos, han demostrado que hay un alto grado de comportamiento estructura-actividad en péptidos bioactivos. De esta manera, se sabe que la estructura tridimensional de un péptido es influenciada por factores como la presencia de ciertos grupos funcionales y la naturaleza de los residuos de aminoácidos presentes, igual que en una proteína. También las características de la estructura secundaria, junto con la secuencia específica de aminoácidos son los factores de mayor importancia en la de-

terminación de las propiedades bioactivas de los péptidos. Otros parámetros estructurales que también son determinantes en la bioactividad son la presencia de las hélices peptídicas, la ciclación, la hidrofobicidad de la superficie, los momentos hidrofóbicos, la carga y tamaño de los dominios hidrofóbicos/hidrofílicos (Agyei *et al.*, 2018; Piovesana *et al.*, 2018; Tiengo *et al.*, 2009).

La actividad antihipertensiva se observa en los péptidos bioactivos que pueden inhibir la enzima convertidora de angiotensina (ECA), la cual tiene un importante papel en la regulación de la presión sanguínea. El potencial antihipertensivo se debe a la composición de aminoácidos, la secuencia de la proteína y el método de obtención de los péptidos. En cuanto a su estructura, los péptidos se componen principalmente de cadenas con 2 a 12 aminoácidos, con altos contenidos de ácido glutámico y ácido aspártico, aminoácidos dicarboxílicos en la posición del nitrógeno terminal y residuos de aminoácidos de cadena ramificada como valina e isoleucina, y también de aminoácidos hidrofóbicos como triptófano, tirosina, fenilalanina o prolina en el carbono terminal. Estos péptidos bioactivos se han obtenido de diversas especies vegetales (tabla II) mediante métodos como la digestión gastrointestinal, hidrólisis enzimática y fermentación (Montone *et al.*, 2018; Piovesana *et al.*, 2018; Tiengo *et al.*, 2009).

Los péptidos antioxidantes generalmente están formados por cadenas de 3 a 6 aminoácidos y tienen un peso molecular más bajo que 1 kDa, se componen de residuos de aminoácidos hidrofóbicos, en particular por histidina, triptófano, fenilalanina, prolina, glicina, lisina, isoleucina y valina, como se reportó en péptidos derivados de proteínas de garbanzos. Las posiciones de los aminoácidos son importantes para que se presente la actividad antioxidant, un caso típico es la valina o leucina en la posición del nitrógeno terminal de péptidos que contienen prolina, histidina o tirosina, también en péptidos con lisina y serina-leucina / tirosina-leucina / prolina-leucina en el nitrógeno y carbono terminales, los cuales se han encontrado en péptidos de arroz, camote, garbanzo y maíz (tabla II). Estos péptidos se obtuvieron por métodos como la hidrólisis enzimática y fermentación (Montone *et al.*, 2018; Piovesana *et al.*, 2018).

Los péptidos con actividad opioide obtenidos de alimentos se llaman «exorfinas», para distinguirlos de los endógenos del

Tabla II. Propiedades bioactivas de hidrolizados proteínicos de diversas fuentes vegetales obtenidos por diferentes métodos

| Técnica de extracción o hidrólisis | Propiedad(es) bioactivas | Fuente vegetal | Referencia |
|---|--|---|--|
| Digestión gastrointestinal | Inhibidora de ECA ^a | Residuos de coliflor, okra | Montone <i>et al.</i> , 2018; Castillo, Angelia, Torio y Belina-Aldemita, 2017 |
| | Antidiabética | Quinua | Piovesana <i>et al.</i> , 2018 |
| | Antioxidante | Salvado de arroz, residuos de coliflor | Montone <i>et al.</i> , 2018; Piovesana <i>et al.</i> , 2018 |
| Hidrólisis enzimática | Antioxidante, opioide, quelante de calcio, hipocolesterolémica, anticancerígena, antiobesidad, ansiolítica | Soya | Piovesana <i>et al.</i> , 2018 |
| | Antioxidante, inhibidora de ECA, opioide, antimicrobiana | Maíz | |
| | Antioxidante, inhibidora de ECA, antimicrobiana, anticancerígena, antitrombótica, antiobesidad | Papa | |
| | Opiode y antimicrobiana | Trigo | Dhaval, Yadav y Purwar, 2016 |
| | Anticancerígena | Quinua | |
| | Ansiolítica | Espinacas | |
| | Hipocolesterolémica, antioxidante, antitrombótica e inhibidora de ECA | Amaranto | Piovesana <i>et al.</i> , 2018; Tiengo <i>et al.</i> , 2009 |
| | Antioxidante | Germen de trigo, semillas de cereza, semillas de durazno | Dhaval <i>et al.</i> , 2016 |
| | Inhibidora de ECA | Frijoles, ajonjolí, brócoli, chícharos, espinaca, arroz, semillas de cereza, residuos de cebada de cervecería | |
| Fermentación con <i>Bacillus subtilis</i> | Antioxidante, inhibidora de ECA | Semillas de tomate | Piovesana <i>et al.</i> , 2018 |
| Fermentación con <i>Lactobacillus plantarum</i> | Inhibidora de ECA | Soya | Singh y Vij, 2017 |
| Altas presiones hidrostáticas | Antioxidante | Garbanzos, lentejas, camote | Piovesana <i>et al.</i> , 2018 |
| | Inhibidora de ECA | Lentejas | |
| Precipitación con solventes | Antimicrobiana | Coco | Algar y Mabesa, 2015 |
| | | Semillas de pepino | Al-Akeel <i>et al.</i> , 2018 |

^aECA: enzima convertidora de angiotensina.

cuerpo humano. Su estructura es corta, de 4 a 8 aminoácidos, en los que se incluyen la tirosina en la región del nitrógeno terminal, precedido por un residuo de prolina y otro aminoácido aromático (fenilalanina o tirosina) en la tercera y cuarta posición del nitrógeno terminal. Algunas proteínas vegetales que presentan actividad opioide son el gluten, la gliadina, la hordeina y la zeína. En la espinaca y soya también se encontraron péptidos opioides, como se muestra en la tabla II (Piovesana *et al.*, 2018).

Otras actividades que se han estudiado en proteínas vegetales (tabla II) son la hipocolesterolémica o hipolipidémica de pseudocereales y leguminosas. Por otra parte, la actividad antimicrobiana se ha comprobado en bacterias gram-positivas y gram-negativas, hongos y virus a partir de proteínas de cereales. Esta actividad es producida por péptidos anfipáticos, con grandes cantidades de residuos de aminoácidos catiónicos e hidrofóbicos, los cuales son capaces de perforar y romper la membrana celular microbiana, llevándola a su muerte (Agyei *et al.*, 2018; Piovesana *et al.*, 2018).

4.1. Aplicaciones en alimentos

Las aplicaciones de los péptidos bioactivos son muy limitadas, ya que son de reciente descubrimiento y poco se ha usado a nivel industrial, debido a varios factores como los altos costos de operación, preocupaciones sensoriales, baja aceptabilidad en el mercado, un incierto potencial de efectos secundarios, entre otros. Sin embargo, la industria de alimentos es uno de los sectores clave para la producción y utilización de los péptidos bioactivos, ya que pueden ser empleados en la fortificación de productos etiquetados como funcionales o nutraceuticos. Según las propiedades que presenten en el área de posible aplicación, por ejemplo, los péptidos con actividad antimicrobiana y antioxidante podrían utilizarse como conservadores naturales para mantener la inocuidad y calidad de los alimentos, y los que tienen actividad antihipertensiva e inmunoestimuladora o inmunomodulatoria servirían en la elaboración de alimentos nutraceuticos. No obstante, se presentan algunos retos en estas aplicaciones, como las complicaciones en las metodologías para asegurar la calidad, datos escasos sobre la biodisponibilidad y

su destino metabólico, y sabores amargos de los péptidos (Agyei *et al.*, 2016; Hajfathalian *et al.*, 2018).

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

En esta revisión se reveló que las plantas y sus semillas son una fuente con alto potencial para la extracción de proteínas, también que el estudio de su composición y propiedades funcionales, bioactivas y nutricionales es importante para poder determinar su aplicación en productos alimenticios. Además, la mayoría de las investigaciones realizadas sobre las diversas propiedades de las proteínas relaciona de alguna forma el efecto generado por su estructura, conformación, las condiciones y métodos de obtención sobre esas propiedades. De esta manera se demuestra en cada caso que estos factores son importantes cuando se quiere trabajar con una proteína específica y explotar alguna de sus propiedades.

El estudio de las proteínas vegetales seguirá siendo un tema de interés en la investigación científica porque aún hay mucho por explicar en relación con el comportamiento estructura-función/actividad, ya que existe una amplia variedad de plantas, semillas y subproductos comestibles que no se han estudiado, los cuales podrían ser una fuente alternativa de proteína alimentaria. Además, aún no hay aplicaciones comerciales en productos alimenticios de los péptidos bioactivos, por lo que este es otro campo que requiere ser tomado en cuenta para futuras investigaciones con aplicaciones en alimentos.

AGRADECIMIENTOS

Yolanda Isabel Delgado García 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 recibido para sus estudios de doctorado.

REFERENCIAS

- Adenekan, M. K., Fadimu, G. J., Odunmbaku, L. A. y Oke, E. K. (2018). Effect of isolation techniques on the characteristics of pigeon pea (*Cajanus cajan*) protein isolates. *Food Science and Nutrition*, 6, 146-152.
- Agyei, D., Acquah, C., Tan, K. X., Hii, H. K., Rajendran, S. R., Udenigew, C. C. y Danquah, M. K. (2018). Prospects in the use of aptamers for characterizing the structure and stability of bioactive proteins and peptides in food. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 410(2), 297-306.
- Agyei, D., Ongkudon, C. M., Wei, C. Y., Chan, A. S. y Danquah, M. K. (2016). Bioprocess challenges to the isolation and purification of bioactive peptides. *Food and Bioproducts Processing*, 98, 244-256.
- Al-akkel, R., Mateen, A., Alharbi, K. K., Alyousef, A. A., Al-Mandeel, H. M. y Syed, R. (2018). Purification and MIC analysis of antimicrobial proteins from *Cucumis sativus L.* seeds. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 18(1), 121, 1-6.
- Algar, A. y Mabesa, L. B. (2015). Isolation and partial characterization of a low molecular weight antimicrobial protein from coconut (*Cocos nucifera L.*) milk. *International Food Research Journal*, 22(5), 1813-1816.
- Alu'datt, M. A., Al-Rabadi, G. J., Alli, I., Ereifej, K., Rababah, T., Alhmad, M. N. y Torley, P. J. (2013). Protein co-precipitates: A review of their preparation and functional properties. *Food and Bioproducts Processing*, 91(4), 327-335.
- Brishiti, F. H., Zarei, M., Muhammad, S. K. S., Ismail-Fitry, M. R., Shukri, R. y Saari, N. (2017). Evaluation of the functional properties of mung bean protein isolate for development of textured vegetable protein. *International Food Research Journal*, 24(4), 1595-1605.
- Bučko, S. D., Katona, J. M., Popović, L. M., Vaštag, Z. G. y Petrović, L. B. (2016). Functional properties of pumpkin (*Cucurbita pepo*) seed protein isolate and hydrolysate. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 81(1), 35-46.
- Carrazco-Peña, L., Osuna-Castro, J. A., De León-Rodríguez, A., Maruyama, N., Toro-Vazquez, J. F., Morales-Rueda, J. A. y Barba de la Rosa, A. P. (2013). Modification of solubility and heat-induced gelation of Amaranth 11S globulin by protein engineering. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(14), 3509-3516.
- Castillo, I. J. B., Angelia, M. R. N., Torio, M. A. O. y Belina-Aldemita, M. D. (2017). Antihypertensive property of the peptic and chymotryptic hydrolysates derived from the crude protein extract of okra [*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench] seeds. *International Food Research Journal*, 26(6), 2586-2592.
- Chao, D., Jung, S. y Aluko, R. E. (2018). Physicochemical and functional properties of high pressure-treated isolated pea protein. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 45, 179-185.
- Chen, J., Mu, T., Zhang, M., Goffin, D., Sun, H., Ma, M. y Zhang, D. (2018). Structure, physicochemical, and functional properties of protein isolates and major fractions from cumin (*Cuminum cyminum*) seeds. *International Journal of Food Properties*, 21(1), 685-701.
- Damodaran, S. y Parkin, K. L. (2017). *Fennema's Food Chemistry* (Fifth edition). Boca Raton, FL: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Deng, J., Sun, T., Cao, W., Fan, D., Cheng, N., Wang, B., ... y Yang, H. (2014). Extraction optimization and functional properties of proteins from kiwi fruit (*Actinidia chinensis planch.*) seeds. *International Journal of Food Properties*, 17(7), 1612-1625.
- Dhaval, A., Yadav, N. y Purwar, S. (2016). Potential applications of food derived bioactive peptides in management of health. *International Journal of Peptides Research and Therapeutics*, 22(3), 377-98.
- FAO (2018). *Biodiversidad para una agricultura sostenible. El trabajo de la FAO sobre el uso de la biodiversidad en la alimentación y la agricultura*. Recuperado el 28 de marzo de 2019: <http://www.fao.org/3/ca2227es/CA2227ES.pdf>
- Franco-Vega, A., Palou, E., Ramírez-Corona, N. y López-Malo, A. (2017). Líquidos iónicos: una alternativa «verde» para procesos de extracción en la industria de alimentos. En: M. T. Jiménez-Munguía, F. Vegara-Balderas, E. Mani-López y M.E. Bárcenas-Pozos (Eds.). *Tendencias en la Ciencia de Alimentos. Temas selectos* (pp. 288-299). San Andrés Cholula: Editorial UDLAP.
- Garba, U. y Kaur, S. (2014). Protein isolates: production, functional properties and application. *International Journal of Current Research and Review*, 6(3), 35-45.
- Hajfathalian, M., Ghelichi, S., García-Moreno, P. J., Sorensen, A. D. M. y Jacobsen, C. (2018). Peptides: Production, bioactivity, functionality, and applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(18), 3097-3129.
- Janssen, F., Pauly, A., Rombouts, I., Jansens, K. J., Deleu, L. J. y Delcour, J. A. (2017). Proteins of amaranth (*Amaranthus spp.*), buckwheat (*Fagopyrum spp.*), y quinoa (*Chenopodium spp.*): a food science and technology perspective. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16(1), 39-58.
- Karami, Z. y Akbari-adergani, B. (2019). Bioactive food derived peptides: a review on correlation between structure of bioactive peptides and their functional properties. *Journal of Food Science and Technology*, 56(2), 535-547.
- Khan, N. M., Mu, T. H., Sun, H. N., Zhang, M. y Chen, J. W. (2015). Effects of high hydrostatic pressure on secondary structure and emulsifying behavior of sweet potato protein. *High Pressure Research* 35(2), 189-202.

- Kuan, Y. H., Bhat, R., Patras, A. y Karim, A. A. (2013). Radiation processing of food proteins- A review on the recent developments. *Trends in Food Science and Technology*, 30(2), 105-120.
- Lafarga, T., Álvarez, C., Bobo, G. y Aguiló-Aguayo, I. (2018). Characterization of functional properties of proteins from Ganxet beans (*Phaseolus vulgaris* L. var. *Ganxet*) isolated using an ultrasound-assisted methodology. *LWT- Food Science and Technology*, 98, 106-112.
- Lee, S. Y., Khoiroh, I., Ooi, C. W., Ling, T. C. y Show, P. L. (2017). Recent advances in protein extraction using ionic liquid-based aqueous two-phases systems. *Separation and Purification Reviews*, 46(4), 1542-2127.
- López, D. N., Ingrassia, R., Busti, P., Wagner, J., Boeris, V. y Spelzini, D. (2018). Effects of extraction pH of chia protein isolates on functional properties. *LWT- Food Science and Technology*, 97, 523-529.
- Mahgoub-Salah, E. O. y Elbashir-Hayat, Z. E. (2009). Proximate composition of Karkadeh (*Hibiscus sabdariffa*) seeds and some functional properties of seed protein isolate as influenced by pH and NaCl. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 60(3), 183-194.
- Malik, M. A., Sharma, H. K. y Saini, C. S. (2017). High intensity ultrasound treatment of protein isolate extracted from dephenolized sunflower meal: Effect on physicochemical and functional properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 39, 511-519.
- Manassero, C. A., Beaumal, V., Vaudagna, S. R., Speroni, F. y Anton, M. (2018). Calcium addition, pH and high hydrostatic pressure effects on soybean protein isolates -Part 2: Emulsifying Properties. *Food and Bioprocess Technology*, 11(11), 2079-2093.
- Martínez, C. S., Ribotta, P. D., Añón, M. C. y León, A. E. (2014). Effect of amaranth flour (*Amaranthus mategazzianus*) on the technological and sensory quality of bread wheat pasta. *Food Science and Technology International*, 20(2), 127-135.
- Mir, N. A., Riar, C. S. y Singh, S. (2018). Nutritional constituents of pseudo cereals and their potential use in food systems: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 75, 170-180.
- Montone, C. M., Capriotti, A. L., Cavalieri, C., La Barbera, G., Piovesana, S., Chiozzi, R. Z. y Laganà, A. (2018). Characterization of antioxidant and angiotensin-converting enzyme inhibitory peptides derived from cauliflower by-products by multidimensional liquid chromatography and bioinformatics. *Journal of Functional Foods*, 44, 40-47.
- Olasunkanmi, G. S., Omolayo, F. T. y Olusegun, O. T. (2017). Fatty acid profile, physic-chemical and functional properties of oil and protein isolate simultaneously extracted from sesame (*Sesamum indicum*) seed. *Annals. Food Science and Technology*, 18(1), 1-10.
- O'Sullivan, J., Murray, B., Flynn, C. y Norton, I. (2016). The effect of ultrasound treatment on the structural, physical and emulsifying properties of animal and vegetable proteins. *Food Hydrocolloids*, 53, 141-154.
- Peng, W., Kong, X., Chen, Y., Zhang, C., Yang, Y. y Hua, Y. (2015). Effects of heat treatment on the emulsifying properties of pea proteins. *Food Hydrocolloids*, 52, 301-310.
- Piovesana, S., Capriotti, A. L., Cavalieri, C., La Barbera, G., Montone, C. M., Chiozzi, R. Z. y Laganà, A. (2018). Recent trends and analytical challenges in plant bioactive peptide separation, identification and validation. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 410(15), 3425-3444.
- Sáenz de Rodrígáñez, M. Á., Medina, E., Moyano, F. J. y Alarcón, F. J. (2011). Evaluation of protein hydrolysis in raw sources by digestive proteases of Senegalese sole (*Solea senegalensis*, Kaup 1858) using a combination of an in vitro assay and sodium dodecyl sulphate polyacrylamide gel electrophoresis analysis of products. *Aquaculture Research*, 42(11), 1639-1652.
- Sakar, A., Kamaruddin, H., Bentley, A. y Wang, S. (2016). Emulsion stabilization by tomato seed protein isolate: Influence of pH, ionic strength and thermal treatment. *Food Hydrocolloids*, 57, 160-168.
- Shevkani, K., Singh, N., Rana, J. C. y Kaur, A. (2014). Relationship between physicochemical and functional properties of amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) protein isolates. *International Journal of Food Science and Technology*, 49(2), 541-550.

- Shoaib, A., Sahar, A., Sameen, A., Saleem, A. y Tahir, A. T. (2018). Use of pea and rice protein isolates as source of meat extenders in the development of chicken nuggets. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(9), 1-7.
- Singh, B. P. y Vij, S. (2017). Growth and bioactive peptides production potential of *Lactobacillus plantarum* strain C2 in soy milk: a LC-MS/MS based revelation for peptides biofunctionality. *LWT Food Science Technology*, 86, 293-301.
- Soria-Hernández, C., Serna-Saldivar, S. y Chuck-Hernández, C. (2015). Physicochemical and functional properties of vegetable and cereal proteins as potential source of novel food ingredients. *Food Technology and Biotechnology*, 53(3), 269-277.
- Tavano, O. L. (2013). Protein hydrolysis using proteases: An important tool for food biotechnology. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 90, 1-11.
- Tavano, O. L., Berenguer-Murcia, A., Secundo, F. y Fernandez-Lafuente, R. (2018). Biotechnological applications of proteases in food technology. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(2), 412-436.
- Tiengo, A., Faria, M. y Netto, F. M. (2009). Characterization and ACE-inhibitory activity of amaranth proteins. *Journal of Food Science*, 74(5), 121-126.
- Wouters, A. G. B., Rombouts, I., Fierens, E., Brijs, K. y Delcour, J. A. (2016). Relevance of the functional properties of enzymatic plant protein hydrolysates in food systems. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(4), 786-800.
- Xue, F., Zhu, C., Liu, F., Wang, S., Liu, H. y Li, C. (2018). Effects of high-intensity ultrasound treatment on functional properties of plum (*Prunus domesticae* semen) seed protein isolate. *Journal of Science Food and Agriculture*, 98(15), 5690-5699.
- Yin, S. W., Tang, C. H., Wen, Q. B., Yang, X. Q. y Li, L. (2008). Functional properties and in vitro trypsin digestibility of red kidney bean (*Phaseolus vulgaris L.*) protein isolate: Effect of high-pressure treatment. *Food Chemistry*, 110(4), 938-945.
- Zhou, T., Zhang, T., Liu, W. y Zhao, G. (2011). Physicochemical characteristics and functional properties of grape (*Vitis vinifera L.*) seeds protein. *International Journal of Food Science and Technology*, 46(3), 635-641.



Compuestos nutritivos y bioactivos del amaranto

(Amaranthus hypochondriacus)

A. E. Peláez-Castañeda* y M. A. P. Porras-Loaiza

*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos
Correo electrónico: ana.pelaezca@udlap.mx • patricia.porras@udlap.mx

RESUMEN

El amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*) es un pseudocereal cuyo origen se reporta en el continente americano. La semilla de amaranto contiene nutrientes como lípidos (4.8-8.1 % b. s.), ácidos grasos como el omega-6, tocoferoles, tocotrienoles y esteroles; proteínas de alta calidad (21 % b. s.) con buen equilibrio de aminoácidos, entre los que se destaca la lisina; carbohidratos (70 % b. s.); vitaminas (A, C, B1, B2, B3, E y ácido fólico), y minerales (fósforo, hierro, magnesio, calcio y zinc). Además, los péptidos, el escualeno, los fitoesteroles y los polifenoles, entre otros compuestos presentes en la semilla de amaranto, han demostrado tener acción bioactiva. En México, el amaranto es conocido y usado en dulces típicos y como cereal, aunque sus aplicaciones cada vez son mayores. Se usa de forma directa como ingrediente, pero también como fuente para la extracción de compuestos como almidón, proteínas y fibra que se utilizan como ingredientes en otros productos alimenticios. El objetivo de esta revisión es resaltar las características, propiedades nutricionales y funcionales, sus diferentes formas de consumo y los usos de esta semilla, haciendo una recopilación de información publicada sobre sus nutrientes y compuestos bioactivos.

Palabras clave: *Amaranthus hypochondriacus*, compuestos bioactivos, nutrientes.

ABSTRACT

Amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) is a pseudocereal native of the American continent. Amaranth seed contains nutrients such as lipids (4.8-8.1 % d. b.), fatty acids such as omega-6, tocopherols, tocotrienols and sterols; high quality proteins (21 % d. b.) with good amino acid balance, among which lysine stands out; carbohydrates (70 % d. b.), vitamins (A, B, C, B1, B2, B3, E and folic acid) and minerals (phosphorus, iron, magnesium, calcium and zinc). In addition, peptides, squalene, phytosterols and polyphenols, are some of the compounds in the amaranth seed that have shown bioactive action. In Mexico, amaranth is known and used in typical candies and as cereal, although its applications are rapidly increasing, both directly, as an ingredient, and as source of extraction of compounds such as starch, protein and fiber that are used as ingredients in other food products. The objective of this review is to highlight the characteristics, properties and uses of this seed, and to compile published information on its nutrients and bioactive compounds.

Keywords: *Amaranthus hypochondriacus*, bioactive compounds, nutrients.

INTRODUCCIÓN

El amaranto es una planta considerada como pseudocereal, utilizada en la alimentación desde tiempos ancestrales por culturas prehispánicas. Las evidencias arqueológicas confirman que se consumían hojas y semillas antes del proceso de domesticación de esta especie entre el 5200-3400 A.C. (Barros y Buenrostro, 1997).

En el continente americano existen alrededor de 70 especies del género *Amaranthus*, de las cuales, más del 80 % son endémicas. Hay registros que indican que la especie *Amaranthus hypochondriacus* es originaria de Norteamérica, específicamente, de México (Montoya-Rodríguez, Gómez-Favela, Reyes-Moreno, Milán-Carrillo y González de Mejía, 2015) y se cultivó desde hace más de 6,000 años en el valle de Tehuacán, extendiéndose a lo largo de México, durante el siglo xv, y no fue sino hasta el siglo XVIII que se introdujo en Asia (Joshi *et al.*, 2018).

El amaranto es fácilmente cultivable en muchas regiones de América, Europa, Asia y África, ya que tolera desde temperaturas templadas hasta tropicales (El Gendy *et al.*, 2018; Joshi *et al.*, 2018). En México, el estado de Puebla es uno de los principales productores de la variedad *A. hypochondriacus*. El amaranto es un cultivo de rápido crecimiento, tiene la capacidad de retener agua, lo cual le permite resistir condiciones de sequía, entre otras situaciones de estrés. Generalmente, se obtienen buenos rendimientos de cosecha, alcanzando en promedio 3 ton/ha, por lo que es una opción de cultivo viable para los productores en zonas marginadas (Espitia-Rangel, Mapes-Sánchez, Núñez-Colín y Escobedo-López, 2010).

Existe evidencia de que los españoles consideraban al amaranto como bledo, ajedrea o armuelle, debido a que creían que era mala hierba en los sembradíos y sin valor, lo que ocasionó que se le restara importancia a su siembra y cosecha durante la Conquista, desalentando su cultivo (Velasco Lozano, 2016). Debido a esto, es importante trabajar actualmente en el rescate del cultivo y consumo de este alimento. A pesar de

ser un alimento con alto valor nutricional por su contenido de carbohidratos, lípidos y proteínas, es poco utilizado en la dieta de muchas familias mexicanas, ya que hasta 2018 no se consideraba un producto básico. Sin embargo, a partir de 2019, el amaranto ha sido integrado en la canasta básica nacional al considerarse como un grano estratégico en la soberanía alimentaria (Muñoz, 2019), esto debido a la cantidad de carbohidratos, lípidos y proteínas que aporta. Estudios demuestran que el amaranto cuenta con compuestos bioactivos como péptidos, fitoesteroles, escualeno y polifenoles, que ayudan a mantener y beneficiar el estado de salud de las personas, contribuyendo en la prevención y tratamiento de enfermedades cardiovasculares, diabetes, cáncer, antioxidante, entre otros (Herrera y Montenegro, 2012; Herrera-Chalé, Betancur-Ancona y Segura-Campos, 2014).

Actualmente en México, el amaranto es usado principalmente como cereal y su forma de consumo más usual es en granolas y dulces tradicionales. Tanto el cultivo como el proceso de comercialización presentan diversos desafíos debido a la falta de recursos y tecnología aplicada en su proceso de producción y transformación, por lo que, en los últimos años, ha sido motivo de investigación en todo el mundo, haciendo referencia al uso del amaranto en combinación con otros cereales para mejorar las propiedades reológicas de productos de panificación, harinas, pastas, entre otros (Albores-Palacios, 2015; Álvarez-Jubete, Arendt y Gallagher, 2009; Ayala-Garay, Espitia-Rangel, Rivas-Valencia, Martínez-Trejo y Almaguer-Vargas, 2016; Cavieres, Piñeira y Negrete, 2016; García-Ortíz, 2016; Palma-Colindres, 2014; Raihan y Saini, 2017; Torres-Merlo, Vallejos-Cazar y Castañeda-Garzón, 2017).

Este artículo de revisión tiene la intención de resaltar la composición nutrimental de la semilla de amaranto, presentando información sobre algunos compuestos bioactivos, así como las aplicaciones como ingrediente debido a sus propiedades funcionales y diferentes formas de consumo.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. Composición de las semillas de amaranto

A lo largo de la historia, se han utilizado más de 10,000 especies vegetales comestibles como parte de la alimentación humana, aunque actualmente, solo se usan alrededor de 150 especies de plantas que son comercializadas globalmente. De dichas especies, únicamente 12 son las que proporcionan aproximadamente el 80 % de la energía de la dieta humana, y más del 60 % del requerimiento proteico y calórico se cumplen con solo 4 especies: arroz, trigo, maíz y papa (FAO, 2005). Por lo anterior, es importante considerar otras especies vegetales que puedan cubrir los nutrientes necesarios como parte de una dieta balanceada, como el amaranto.

La equilibrada composición del amaranto puede proporcionar nutrientes esenciales que se requieren para un adecuado crecimiento y desarrollo de la población, así como prevenir trastornos nutricionales, por lo que es utilizado como parte de la dieta de personas en comunidades rurales de bajos ingresos (Kachiguma, Mwase, Maliro y Damaliphetsa, 2015).

La semilla de amaranto está compuesta, en su mayoría, por carbohidratos (70% b. s.); es excelente fuente de proteínas (21 % b. s.) de alta calidad, posee el doble de lisina (5.9-8.9 g/100 g de proteína) en comparación con otros granos como el maíz y trigo; es rica en minerales (Ca, K, P, Fe y Mg), compuestos fenólicos y ácidos grasos insaturados; además, el amaranto es libre de gluten, por lo que puede ser consumido por personas celiacas. Es importante considerar que la composición química de las semillas de amaranto puede variar de acuerdo con la especie del grano, el lugar y las condiciones de cultivo (El Gendy *et al.*, 2018; Joshi *et al.*, 2018; Mustafa, Seguin y Gélinas, 2011; Venskutonis y Kraujalis, 2013).

Mustafa *et al.* (2011) estudiaron la composición química de 28 genotipos diferentes de semilla de amaranto, entre ellas, *A. hypochondriacus* procedentes de Pensilvania, una semilla

blanca y otra dorada. Dichos autores observaron que existe una relación entre el color de la semilla y las concentraciones de almidón, fibra de detergente neutro (FDN), fibra dietética total, lípidos, taninos, cenizas y minerales como el calcio y el magnesio. La concentración de cenizas, proteína cruda y fibra dietética (total y soluble) resultó ser más alta en las semillas de mayor coloración, resultados que coinciden con lo reportado por Pedersen, Kalinowski y Eggum (1987). El calcio y el magnesio tienen un comportamiento similar, las concentraciones más altas se presentan en las semillas doradas de *A. hypochondriacus*, mientras que el fósforo, potasio y sodio no se ven afectados por la coloración de la semilla. Por el contrario, la cantidad de almidón, lípidos y taninos totales presentes en las semillas blancas de *A. hypochondriacus* es mayor que en las semillas doradas. Kaur, Singh y Rana (2010) estudiaron el contenido de la fibra dietética y observaron que al igual que otros nutrientes el color de la semilla influye en dicho contenido, las semillas de *A. caudatus* tenían coloración marrón rojizo mientras que las de *A. hypochondriacus* presentaron una coloración amarilla cremosa. Se observó que a mayor valor de a* y menores valores de L* y b*, había mayor contenido de fibra.

1.1. Nutrientes

1.1.1. Lípidos

La semilla de amaranto contiene de 4.8-8.1 % de lípidos (b. s.) (Saunders y Becker, 1984) y es muy buena fuente de ácidos grasos poliinsaturados, entre los que destacan el omega-6 y el omega-3, además contiene triterpenos como el escualeno (Abreu, Hernández, Castillo, Sampere y Martín, 1995; El Gendy *et al.*, 2018). El Gendy *et al.* (2018) determinaron el contenido de lípidos en *A. hypochondriacus*, encontrando que es significativamente mayor que en especies del género *A. cruentus*; además, los ácidos grasos mayoritarios son el linoleico, el palmitíco y el oleico (ver tabla I).

Tabla I. Composición de materia seca, lípidos, ácidos grasos y escualeno de la semilla de *A. hypochondriacus*

| Parámetro | Concentración |
|---|---------------|
| Materia seca (100 g de semilla) | 89.97 |
| Lípidos (100 g de semilla) | 7.87 |
| Ác. grasos saturados (100 g de lípidos totales) | 18.51-28.60 |
| Mirístico | 0.21-0.29 |
| Palmítico | 13.76-23.80 |
| Margárico | 0.08 |
| C18:0 iso | 0.36 |
| Esteárico | 2.53-3.98 |
| Araquídico | 0.56-0.89 |
| Behénico | 0.14-0.32 |
| Lignocérico | 0.28 |
| Ác. grasos monoinsaturados (100 g de lípidos totales) | 23.10-30.14 |
| Palmitoleico | 0.10-0.19 |
| Oleico | 22.80-28.82 |
| Oleico cis-11 | 0.89 |
| Oleico cis-12 | 0.15 |
| Ác. grasos poliinsaturados (100 g de lípidos totales) | 29.59-50.00 |
| Linoleico | 28.71-49.10 |
| Linolénico | 0.65-0.93 |
| Escualeno (100 g de lípidos totales) | 5.72 |

Adaptada de Jahaniaval, Kakuda y Marcone (2000) y El Gendy *et al.* (2018).

El procesamiento de semillas de amaranto y los tratamientos que se le aplican influyen en el contenido de los lípidos y en su composición (Venskutonis y Kraujalis, 2013). Kaur *et al.* (2010) estudiaron 48 variedades de *A. hypochondriacus* y 11 de *A. caudatus*, y observaron mayor contenido de grasa en *A. caudatus*. Barba de la Rosa *et al.* (2009) obtuvieron harina de amaranto a partir de la molienda de semillas de *A. hypochondriacus* y reportaron un contenido de lípidos del 7.9-8.9 %. En estudios más recientes, se ha visto que el tamaño de partícula y la fracción de molienda es crucial en el procedimiento de extracción de los lípidos de amaranto debido al área de superficie que estará expuesta y en contacto con el solvente (Venskutonis y Kraujalis, 2013).

La composición de los ácidos grasos del amaranto puede modificar las propiedades nutricionales, durante los procesos tecnológicos empleados durante la transformación del grano (Venskutonis y Kraujalis, 2013), dichas propiedades nutrimen- tales han sido determinadas en diversos estudios en los que se ha visto que los principales ácidos grasos del amaranto, considerando las diferencias que se presentan entre variedades y condiciones de cultivo, son el palmítico, el oleico y el linoleico, como se muestra en la tabla I. El aceite de amaranto contiene un alto grado de insaturación, por lo que es probable que el contenido de ácidos grasos se modifique durante el procesamiento de la semilla usada en diferentes aplicaciones (Venskutonis y Kraujalis, 2013). Un estudio de Sujak y Dziwulski-Hunek (2010) demostró que el contenido de ácidos grasos esenciales en la semilla de amaranto cosechada se ve favorecido con la estimulación electromagnética de luz láser y/o campo magnético aplicado a las semillas, aumentando dicho contenido.

Entre los fitoesteroles presentes en la semilla de *A. hypochondriacus* se encuentran el campesterol, el estigmasterol y el β -sitosterol. El β -sitosterol es el mayoritario al representar más del 50 % de los fitoesteroles. Además, contiene escualeno, cuyo contenido es de alrededor de 5.72 g/100 g de lípidos totales. La extracción común de escualeno es primordialmente de origen animal, debido a la preocupación por la conservación de las especies marinas a nivel internacional, el amaranto se convierte en una fuente vegetal viable de extracción del escualeno

(Huang, Lin y Fang, 2009). Por esta razón, resulta importante establecer fuentes alternas para el suministro de este compuesto (Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2015).

1.1.2. Proteínas

La semilla de amaranto tiene 13.1-21.0 % de proteína cruda (b. s.). El 35 % del total de la proteína del grano se encuentra en el perispermo, y el resto se localiza en el germen (Joshi *et al.*, 2018; Montoya-Rodríguez *et al.*, 2015). Las proteínas presentes en el grano de amaranto son de alta calidad y valor biológico debido al equilibrio de la composición de aminoácidos comparada con otras fuentes como maíz, arroz, trigo y cebada. En general, el amaranto es una opción viable para sustituir ciertos cereales gracias a la funcionalidad de sus proteínas (Montoya-Rodríguez *et al.*, 2015), incluyendo su capacidad de absorción de agua y aceite. El 50-60 % de la proteína total está constituida de albúminas y globulinas de fácil digestión, el 20.8 % la componente glutelinas álcali solubles y el 12 % son prolaminas solubles en alcohol y su digestibilidad es del 90 % (Grobelnik-Mlakar *et al.*, 2010; Zhelezov, Solonenko y Zhelezova, 1997).

En los aislados de proteína de amaranto, la principal fracción proteica está constituida por globulinas, globulina 11S (amarantina) y la globulina 7S. La globulina 11S es la proteína mayoritaria en la semilla de amaranto y la encargada del almacenamiento de nutrientes, es rica en lisina y soluble en soluciones salinas, cuenta con 501 residuos de aminoácidos y una masa molecular de 56 kDa; a esta proteína se le atribuye buena parte de las propiedades nutricias del grano (Barba de la Rosa, Herrera-Estrella, Utsumi y Paredes-López, 1996). Por otro lado, la globulina 7S está presente en menor cantidad, por lo que ha sido menos estudiada que la globulina 11S. Se ha reportado que está formada por 3 subunidades principales llamadas α (57-68 kDa), α' (57-72 kDa) y β (42-52 kDa), unidos por enlaces no covalentes para formar un trímero con una masa molecular aproximada de 170-200 kDa (García-González, Flores-Vazquez, Barba de la Rosa, Vazquez-Martínez y Ruiz-García, 2013).

Otras proteínas del amaranto, como las prolaminas y las glutelinas, tienen tareas específicas en la semilla; por ejemplo, la transferencia de fosfolípidos y la regulación de la deposición de

cerá en las paredes celulares de células epidérmicas, la transferencia de glicosilo a través de las membranas, la destrucción de radicales tóxicos, la síntesis de almidón, la síntesis de aminoácidos esenciales, entre otras (Casique, Martínez, González y Delano, 2014; Castrillon-Arbeláez, Martínez-Gallardo, Avilés Arnaut, Tiessen y Délano-Frier, 2012; Ramírez-Medeliz *et al.*, 2003).

Se ha reportado que en las especies silvestres hay mayor cantidad de proteínas, aminoácidos y otros nutrientes, en comparación de las especies cultivadas (Joshi *et al.*, 2018). Tömösközi, Baracska, Schönlechner, Berghofer y Lászity (2009) estudiaron granos de *A. hypochondriacus* cultivados en Hungría y Austria, y encontraron diferencias en el contenido proteico, variando entre 14.2-17.4 %. En otro estudio, Abbasi, Rouzbehani y Rezaei (2012) encontraron que aumentando la tasa de fertilización con nitrógeno, la proteína cruda y la proteína verdadera aumentaban (9 % y 6.42 %, respectivamente) en *A. hypochondriacus*. De igual forma, Sujak, Dziwulski-Hunek y Kornarzynski (2009) demostraron que es posible mejorar tanto la composición como el contenido de aminoácidos de las semillas de amaranto usando métodos de estimulación electromagnética; la estimulación previa con luz láser de helio-neón y campos magnéticos aumentan la proteína cruda en las semillas de amaranto en un 3.4 %.

El contenido de aminoácidos esenciales oscila entre 31 y 45 g/100 g de la proteína total, asemejándose a la proteína ideal propuesta por la FAO para la alimentación humana. El perfil de la composición de aminoácidos del amaranto generalmente está más cercano al de las leguminosas a excepción de los aminoácidos que contienen azufre, que están presentes en cantidades más altas en amaranto que en las legumbres (Venskutonis y Kraujalis, 2013). El amaranto es rico en lisina (5.9-8.0 g/100 g de proteína), sin embargo, se puede ver disminuida al calentar las semillas (Tömösközi *et al.*, 2009); también es buena fuente de triptófano. Estos dos aminoácidos son limitantes en otros granos (Grobelnik-Mlakar, Turinek, Jakop, Bavec y Bavec, 2010). La metionina contenida en la semilla de *A. hypochondriacus* representa hasta el 2.3 % de la composición de aminoácidos en semillas de México y República Checa, y son comparativamente más altos que en la mayoría de las especies de leguminosas como soya, frijoles, lentejas o garbanzos (Joshi *et al.*, 2018).

Tabla II. Composición de aminoácidos (porcentaje del total de la proteína) de la semilla de *A. hypochondriacus*

| Aminoácido | República Checa | Eslovaquia | México |
|-----------------|-----------------|------------|--------|
| Triptófano | - | 1.8 | 1.3 |
| Metionina | 2.3 | 0.6 | 2.3 |
| Treonina | 4.5 | 3.3 | 4.6 |
| Isoleucina | 3.8 | 2.7 | 4.0 |
| Valina | 5.3 | 3.9 | 4.4 |
| Lisina | 8.0 | 6.0 | 6.1 |
| Fenilalanina | 6.9 | 4.7 | 4.8 |
| Leucina | 6.9 | 4.2 | 6.2 |
| Tirosina | - | 3.7 | 4.3 |
| Histidina | 1.7 | 3.8 | 2.7 |
| Arginina | 14.5 | 9.5 | 8.1 |
| Alanina | 6.2 | 3.3 | 3.9 |
| Ácido aspártico | 10.7 | 8.2 | 8.1 |
| Ácido glutámico | 17.7 | 14.6 | 6.6 |
| Glicina | 15.2 | 6.8 | - |
| Prolina | 3.7 | 2.8 | - |
| Serina | 9.3 | 4.9 | - |

Adaptada de Dodok *et al.* (1997); Písáriková *et al.* (2005); Morales Guerrero *et al.* (2009).

En la tabla II, se pueden observar diferencias notables en la composición de aminoácidos entre el *A. hypochondriacus* cultivado en República Checa (Písáriková, Kracmar y Herzig, 2005), el cultivado en Eslovaquia (Dodok, Modhir, Buchtová,

Halásová y Poláček, 1997) y el cultivado en México (Morales Guerrero, Vázquez Mata y Bressani Castignoli, 2009). La semilla de *A. hypochondriacus* cultivado en Eslovaquia presentó las concentraciones de aminoácidos más bajas a excepción de la histidina. Por el contrario, las semillas de la República Checa presentaron concentraciones más altas de valina, lisina, fenilalanina, arginina, alanina, ácido aspártico y ácido glutámico, mientras que la metionina, la treonina, la isoleucina y la leucina no presentaron diferencia entre las semillas de México y República Checa.

Juan, Pastor, Alaiz, Megías y Vioque (2007) estudiaron el perfil de proteínas y la composición de aminoácidos de 11 especies de amaranto silvestres, incluida *A. hypochondriacus* mediante cromatografía de filtración en gel y electroforesis desnaturalizante, encontraron que los perfiles de aminoácidos eran similares en todas las especies, con pequeñas variaciones en el peso molecular y cantidades de las principales proteínas en la semilla. Para *A. hypochondriacus* y *A. graecizans*, la composición de aminoácidos fue la más deficiente con limitaciones en 5 aminoácidos esenciales (histidina, metionina, triptófano, fenilalanina y valina).

1.1.3. Carbohidratos

Los carbohidratos son la principal fuente de energía de la dieta humana. La semilla de amaranto contiene alrededor del 70% (b. s.) de carbohidratos almacenados en el perispermo. Las semillas de amaranto se componen principalmente por polisacáridos, el almidón que es el componente principal representa el 62-75% del peso total de la semilla; la fibra dietética es del 4-5%. El azúcar principal es la sacarosa en un 1.1-2.4% seguido de la rafinosa en un 0.5-1.2%, el inositol, la estaquiosa de 0.02-0.2% y la maltosa de 0.02-0.4%. Además, tiene hasta 3 veces mayor contenido de sacarosa comparado con el trigo (Becker *et al.*, 1981; Burisová, Tomasková, Sasinková y Ebringerová, 2001; Montoya-Rodríguez *et al.*, 2015; Venskutonis y Kraujalis, 2013).

Un componente importante es la fibra dietética, conformada por polisacáridos no digeribles, oligosacáridos, lignina

y otras sustancias asociadas a la planta (Kaur *et al.*, 2010). De acuerdo con Hozová, Kuniak, Moravčíková y Gajdošová (2007) el amaranto contiene más del 25 % del total de la fibra de β -(1,3)-D-glucano insoluble en agua (liquenano), porcentaje que es superado únicamente por la avena. Otros reportes del contenido de fibra indican que la harina de amaranto extruida contiene alrededor de 13.9 % de fibra total, mientras que, en la harina sin procesar, el contenido de fibra total aumenta a 14.6 %, el proceso de extrusión es un factor que modifica el contenido total de fibra, como resultado de este proceso se producen una serie de cambios en la forma, estructura y composición del producto (Montoya-Rodríguez *et al.*, 2015; Repo-Carrasco-Valencia, Peña, Kallio y Salminen, 2009).

1.1.4. Vitaminas y minerales

Los nutrientes inorgánicos de la semilla de amaranto se encuentran en el epispermo, el endoespermo y el germen. Los minerales que integran el amaranto (tabla III) son calcio, hierro, magnesio, manganeso, fósforo, potasio, sodio, cobre y zinc, encontrándose en mayores concentraciones que en otros cereales.

Tabla III. Composición de minerales de la semilla de *A. hypochondriacus*

| Macrominerales | mg/g | Micronutriente | mg/g |
|----------------|-----------|----------------|------|
| Calcio | 1.91-2.57 | Cobre | 0.02 |
| Fósforo | 6.18-6.31 | Hierro | 0.17 |
| Magnesio | 3.34-3.57 | Manganeso | 0.06 |
| Sodio | 1.25-1.66 | Zinc | 0.05 |
| Potasio | 6.07-7.49 | - | - |

Adaptada de Saunders y Becker (1984); Mustafa *et al.* (2011).

Las vitaminas que destacan son vitaminas del complejo B, incluyendo la niacina (0.5 mg/100 g de semilla), tiamina (0.14 mg/100 g de semilla) y ácido ascórbico (4.5 mg/100 g de semilla). Se puede encontrar también riboflavina (0.34 mg/100 g de semilla), en mayor proporción que en otros cereales, incluso que en la leche aunque en menor cantidad que en el huevo (Morales Guerrero *et al.*, 2009).

1.1.4.1. Tocoferoles y tocotrienoles

Desde hace poco más de dos décadas se tiene reporte de la presencia de tocotrienoles en semillas de amaranto, siendo los más comunes α -tocopherol (2.97-15.65 mg/kg), β -tocotrienol (5.92-11.47 mg/kg), y el γ -tocotrienol (0.95-8.69 mg/kg).

Al igual que en la extracción de otros compuestos, también se debe tomar en cuenta la técnica utilizada al evaluar los rendimientos obtenidos de los tocoferoles. Bruni, Guerrini, Scalia, Romagnoli y Sacchetti (2002) compararon los métodos tradicionales con la extracción supercrítica con CO_2 (ESC- CO_2) y ultrasónico como coadyuvante en la extracción. Con el tratamiento con ESC- CO_2 existe menor riesgo de degradación de componentes termolábiles y mejores rendimientos en los extractos, obteniendo 47 % de α -tocopherol y 63 % de β -tocotrienol más, comparado con el tratamiento con ultrasónico, con lo que se logra optimizar el tiempo del proceso de extracción.

Por otra parte, las muestras de amaranto fresco han demostrado tener niveles más altos de tocotrienoles que cuando se almacenan, debido al proceso de rancidez (Lehmann, Putnam y Qureshi, 1994).

1.2. Compuestos bioactivos

Un compuesto bioactivo puede definirse como aquel compuesto en los alimentos que tiene impacto beneficioso a la salud después de su ingesta. Generalmente, estos compuestos se encuentran en cantidades pequeñas en productos vegetales y en aquellos que son ricos en lípidos (Herrera Chalé, *et al.*, 2014).

El amaranto se ha utilizado desde tiempos prehispánicos, debido a las propiedades nutricionales con las que cuenta. En los últimos años ha sido objeto de estudio al evidenciar el contenido de compuestos medicinalmente activos, además tiene el beneficio de ser libre de gluten. Estudios proponen que las propiedades medicinales que presenta el amaranto se deben a la presencia de péptidos, tocoferoles mixtos, fitoesteroles, escualeno y flavonoides bioactivos, entre otros compuestos que se describen a continuación (Joshi *et al.*, 2018).

1.2.1. Péptidos

El amaranto posee secuencias de péptidos que se encuentran inicialmente inactivas en sus proteínas; cuando estas sufren una hidrólisis durante la ingesta o el procesamiento de este producto, los péptidos son liberados y pueden ejercer una acción biológica, lo que le otorga a la semilla capacidad antihipertensiva y antioxidante. Los péptidos que se encuentran en los hidrolizados de amaranto extruidos y sin procesar contienen aminoácidos como la lisina, prolina, histidina, glicina, alanina y treonina, que poseen actividad antioxidante (Montoya-Rodríguez *et al.*, 2015).

La enzima convertidora de angiotensina (ECA) actúa estrechando los vasos sanguíneos, se desarrolla principalmente en el riñón y es soluble en sangre, orina, linfa, edema pulmonar y líquido cefalorraquídeo (Mauer, Exaire y Escalante, 2001). La actividad inhibitoria de la ECA es la principal actividad biológica estudiada en el amaranto (Caselato-Sousa y Amaya-Farfán, 2012). En el *A. hypochondriacus* se han identificado los tetrapéptidos ALEP y VIKP (con valores de IC₅₀ de 6.32 mM y 175 µM, respectivamente) que inhiben la ECA y tratan la insuficiencia cardiaca y la hipertensión (Vecchi y Añón, 2009).

Por otra parte, se han identificado péptidos a partir de la proteína globulina 11S del amaranto que han mostrado actividad inhibitoria de la ECA y de la DPP-IV (dipeptidil peptidasa), enzima relacionada con el desarrollo de diabetes tipo II, bloqueando la degradación de hormonas y favoreciendo el control glucémico natural en pacientes diabéticos (Montoya-Rodríguez *et al.*, 2015). Se sugiere, entonces, que los péptidos de amaranto podrían utilizarse como ingredientes alimentarios funcionales en la prevención de la diabetes.

Otros estudios (Silva-Sánchez *et al.*, 2008) indican que la proteína de *A. hypochondriacus* podría tener propiedades anticancerosas similares a las de la lunasina de soya, un péptido de 43 aminoácidos aislado de la fracción proteínica de albúminas del cotiledón de la soya con propiedades quimiopreventivas demostradas (Dia, Torres, De Lumen, Erdman y Gonzalez, 2009).

1.2.2. Fitoesteroles

En el caso del amaranto, la información reportada de los esteroles presentes en el aceite es muy poca (León-Camacho, García-González y Aparicio, 2001). Los fitoesteroles son esteroles de origen vegetal pertenecientes al grupo de los isoprenoides, y se encuentran de manera natural en los alimentos, particularmente en semillas de oleaginosas y cereales. Su estructura química es similar a la del colesterol, aunque a diferencia de este, que cuenta con 27 átomos de carbono, los fitoesteroles poseen 28 o 29 átomos debido a la presencia de sustituyentes de tipo metilo o etilo en la cadena lateral de la molécula, distribuidos en un núcleo de 17 carbonos en 4 anillos con un grupo 3-β hidroxilo y una cadena carbonada de 9 a 10 carbonos. Estos compuestos se producen a través de la biosíntesis de los isoprenoides en el citoplasma, posterior a 25 reacciones catalizadas por diferentes enzimas. Se generan a partir de moléculas de acetil-CoA y por la actividad enzimática de la enzima acetil-CoAcarboxilasa (Acc), convirtiendo la acetil-CoA en 3-hidroxi-3-metilglutaril CoA, la cual a su vez se reduce a melovato. El melovato mediante procesos sucesivos de fosforilaciones y una descarboxilación es transformado en isoprenoide, el que finalmente da origen a los fitoesteroles. Los fitoesteroles son compuestos importantes en la formación de microdomios en la membrana plasmática en procesos celulares de las plantas (Silva, Pinheiro, Rodríguez, Figueroa y Baginsky, 2016) y se han identificado 250 estructuras diferentes, siendo los más comunes el β-sitoesterol, el campesterol y el estigmasterol, los cuales están presentes en la semilla de amaranto (tabla I) (El Gendy *et al.*, 2018).

Los fitoesteroles tienen propiedades hipocolesterolémicas, ya que contribuyen a reducir la absorción de colesterol a través de su solubilización y competencia por espacio en las micelas, ya que poseen una estructura similar y disminuyen el factor de riesgo cardiovascular (Silva *et al.*, 2016).

Se ha reportado que un consumo regular de 1-3 g diarios puede reducir los niveles de colesterol en la sangre hasta en un 15 %, además puede ayudar en la prevención de cáncer, aterosclerosis e inflamaciones (El Gendy *et al.*, 2018). Sin embargo, se calcula que la ingesta diaria de fitoesteroles es de 160-500 mg/día, con lo cual no se alcanza la dosis recomendada para obtener efectos bioactivos en el ser humano (Silva *et al.*, 2016).

Se han encontrado fitoesteroles tanto en el aceite como en las semillas de amaranto, sus cantidades varían entre especies y variedades, sin embargo, cerca del 93 % del total de fitoesteroles es de β -sitoesterol (El Gendy *et al.*, 2018). A pesar de que el amaranto es considerado como pseudocereal, posee la mayor concentración de fitoesteroles (178 mg/100 g de semilla), comparado con el resto de los cereales, siendo 5 veces superior a la concentración de la harina de trigo (36 mg/100 g de semilla) (tabla IV) (Silva *et al.*, 2016).

Tabla IV Concentración de fitoesteroles en alimentos

| Cereales | Concentración mg/g |
|------------------|--------------------|
| Centeno | 110 |
| Trigo | 76 |
| Harina de trigo | 36 |
| Cebada | 83 |
| Avena | 52 |
| Maíz | 44 |
| Arroz | 80 |
| Sorgo | 48 |
| Pseudo- cereales | Concentración mg/g |
| Amaranto | 178 |
| Quinoa | 83 |
| Alforfón | 107 |

Adaptada de Silva *et al.*, (2016).

Hay varios factores que pueden afectar las concentraciones de los fitoesteroles presentes en los alimentos, como riego deficitario, fertilización y fecha de siembra, sin embargo, se requiere de más estudios para poder usar dichos factores a favor, y lograr mayores concentraciones de estos compuestos (Silva *et al.*, 2016).

1.2.3. Escualeno

El escualeno (2, 6, 10, 15, 19, 23- hexametil-2, 6, 10, 14, 18, 22-tetracosahexano) es un ácido triterpeno intermedio en la vía de la biosíntesis del colesterol y su uso es más frecuente en la industria cosmética para productos destinados a la piel; muestra algunas ventajas como agente emoliente, antioxidante, hidratante y antitumoral; posee acción fotoprotectora y es un compuesto termoestable muy efectivo en el tratamiento y envejecimiento de la piel, ayudando en la prevención del daño celular, por lo que es utilizado como material en formulaciones de aplicación tópica, como emulsiones de lípidos y portadores de lípidos nanoestructurados. Además, tiene acción hipocolesterolémica en combinación con otros compuestos, su consumo tiene efecto en la disminución de los niveles de colesterol, y se le relaciona con efectos anticancerígenos de colon, piel y pulmón (Abreu *et al.*, 1995; El Gendy *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2009; Venskutonis y Kraujalis, 2013).

La fuente más importante de escualeno es el aceite de hígado de tiburón y ballena. Debido a los problemas que se pueden llegar a presentar en la extracción y purificación del escualeno proveniente de fuentes animales, se ha considerado la obtención de este compuesto a partir de fuentes vegetales (Venskutonis y Kraujalis, 2013). El aceite de amaranto ha resultado ser una fuente importante de escualeno, ya que la cantidad presente (5.72 g escualeno/100 g de lípidos) es mayor que la que se encuentra en el aceite de oliva, germen de trigo y salvado de arroz, la cual va de 0.1-0.7 % (El Gendy *et al.*, 2018). El contenido de escualeno en el amaranto varía incluso en la misma especie, de acuerdo a las condiciones de cultivo y las técnicas de extracción. El Gendy, *et al.* (2018) reportaron 5.72 g de escualeno/100 g de lípidos totales de semilla de *A. hypochondriacus* (tabla I), mientras que He, Cai, Sun y Corke (2002) obtuvieron 3.6 g escua-

leno/100 g de lípidos, por lo que recomiendan que para conseguir rendimientos de escualeno altos, se deben realizar extracciones y procedimientos con purificaciones en varios pasos.

El tipo de procesamiento al que se someta la semilla para la extracción de escualeno es un factor crucial, ya que afecta la distribución y contenido de este compuesto. Gamel, Mesallam, Damir, Shekib y Linssen (2007) demostraron que la aplicación de tratamiento térmico (180 °C/10 segundos) aumenta el contenido de escualeno. Por otro lado, Tikekar, Ludescher y Karwe (2008) estudiaron la estabilidad de procesamiento del escualeno y la capacidad antioxidante del amaranto reventado y tostado. Los resultados demostraron que el escualeno se mantiene estable durante todas las operaciones de procesamiento, presentando una pérdidas del 12 % durante el tostado a 150 °C durante 20 minutos. El escualeno puro resultó ser un antioxidante débil, mientras que el extracto lipófilo de amaranto presentó mayor actividad antioxidante, sugiriendo que los tocotrienoles y otros ingredientes menores también desempeñan un papel como antioxidantes.

1.2.4. Otros compuestos

Otros compuestos que también presentan efecto bioactivo son los polifenoles, los tocoferoles, los tocotrienoles, las saponinas, los taninos, los enoles, los flavonoides, los alcaloides, el glucósido de calcio, los esteroides y los triterpenoides, los cuales tienen acción antiinflamatoria y anticancerogénica (Joshi *et al.*, 2018).

1.2.4.1. Polifenoles

Los principales compuestos que proporcionan la actividad antioxidante en el grano de amaranto son los polifenoles (Montoya-Rodríguez *et al.*, 2015). Barba de la Rosa *et al.* (2009) evaluaron diferentes cultivares de amaranto e identificaron algunos polifenoles como la isoqueracetina y la rutina; igualmente, los ácidos fenólicos como los ácidos jeringo y vanílico. López-Mejía, López-Malo y Palou (2014) evaluaron la capacidad antioxidante de los extractos de hojas y semillas del amaranto, concluyeron que ambos tejidos tienen una capacidad antioxi-

dante atribuida no solo a los compuestos fenólicos sino también a la presencia del escualeno.

2. Usos, aplicaciones y propiedades de las semillas de amaranto

Las semillas de amaranto son la principal parte de la planta usada como alimento, por lo que tienen muchas aplicaciones. Estas pueden ser sometidas a diferentes tratamientos (inflado, tostado o molienda) para utilizarlas en bebidas o harinas para productos de panificación. El grano reventado se refiere a la semilla que se coloca en comales de barro o metálicos, calentados a fuego de leña o de gas para que se inflé. Una vez reventado, se enfriá el grano, se criba y se envasa para su almacenamiento y comercialización, o como insumo de otros productos (Ayala *et al.*, 2014; Ayala-Garay *et al.*, 2016).

En México, se producen 79.9 % de productos con grano reventado, 17.2 % en harina y 2.9 % en extruido. El 58.9 % de los productos con amaranto reventado se consume en forma de dulce tradicional (alegrías), además de palanquetas simples, obleas, cubiertos y otros productos, siendo los productores y sus familias, generalmente, quienes procesan la semilla y la comercializan. Además, se usa como suplemento para alimento de animales, en la preparación de granola o para el consumo directo (Ayala-Garay *et al.*, 2016; Montoya-Rodríguez *et al.*, 2015). En algunas comunidades de México, los granos se hierven y cocinan de manera similar al arroz y el almidón lo que da una textura especial al guiso (Herrera y Montenegro, 2012). La harina de amaranto se ha utilizado también para preparar diferentes productos alimenticios como galletas, pastas, pan, bebidas y tamales (Díaz-Ortega *et al.*, 2004; Montoya-Rodríguez *et al.*, 2015).

En muchos países europeos, así como en Estados Unidos, el amaranto es utilizado para sustituir el uso del trigo en productos que se incluyen en dietas de personas celiacas, ya que cuenta con albúminas y globulinas de fácil digestión y es libre de gluten, por lo que es factible su aplicación como ingrediente funcional en muchos productos de panificación (Venskutonis y Kraujalis, 2013). La harina elaborada a partir de semilla de amaranto se uti-

liza en productos de cereales para aumentar el valor nutricional y favorecer la digestibilidad, además de mejorar la calidad de las proteínas, el contenido lipídico y el perfil de aminoácidos sin que los aspectos sensoriales se vean afectados (Joshi *et al.*, 2018).

Se ha visto que los diferentes compuestos nutrimentales de la semilla de amaranto, como las globulinas y el almidón, tienen también aplicaciones como ingredientes debido a sus propiedades funcionales. Tandang-Silvas *et al.* (2012) estudiaron las propiedades fisicoquímicas de las globulinas 7S y 11S de las semillas de amaranto, y encontraron que son de alta estabilidad térmica y con buenas propiedades emulsionantes. Por la capacidad de producción de espuma del 44 %, estabilidad de espuma del 96 %, capacidad de absorción de aceite 70.5 %, actividad emulsificante 79.3 % y estabilidad de emulsión de 93.7 %, a pH de 7.0, estas globulinas del grano de amaranto pueden ser utilizadas en la industria alimentaria con gran versatilidad (Morales Guerrero *et al.*, 2009).

Por otra parte, el comportamiento del almidón es diferente según la especie de la que se extraiga. La harina de *A. hypochondriacus* tiene una temperatura de pastado más alta y una viscosidad, descomposición y retroceso máximos más bajos que los presentes en harina elaborada a partir de semillas de *A. caudatus* (Kaur *et al.*, 2010). Bello-Pérez y Paredes-López (2009) estudiaron los procesos que se llevan cabo durante el manejo y elaboración de la harina y encontraron que estos afectan también la estructura cristalina del almidón y el grado de gelatinización (durante calentamiento), sin embargo, se ha visto que la integridad granular se conserva (González *et al.*, 2007). También se han estudiado las condiciones de remojo durante la molienda húmeda ácida del grano de amaranto, demostrando cambios en el módulo viscoelástico y las propiedades térmicas del almidón de amaranto por efecto de la temperatura (40-60 °C) (Loubes, Calzetta Resio, Tolaba y Suárez, 2012).

Los beneficios bioactivos del amaranto pueden aplicarse también en la elaboración de películas comestibles incorporando los compuestos bioactivos de las semillas, los cuales actúan como agentes antimicrobianos y antioxidantes para que de esta manera se pueda dar al producto mayor vida de anaquel o contribuir

con las propiedades sensoriales (Montes Hernández *et al.*, 2017). Rizzello *et al.* (2009) estudiaron 4 péptidos con actividad antifúngica en el extracto crudo soluble en agua de semillas de amaranto, y encontraron una concentración mínima inhibitoria de 5 mg de péptidos/ml para inhibir especies de hongos aisladas de panaderías, durante el almacenamiento de panes sin gluten y de harina de trigo. El desarrollo de películas comestibles ha cobrado interés actualmente debido a las necesidades de inocuidad, seguridad alimentaria y el aumento en el uso de materiales biodegradables.

CONCLUSIÓN Y COMENTARIOS FINALES

La influencia que tienen los factores externos, como el lugar de cultivo y las condiciones de cosecha, entre otros factores, tienen gran impacto en la composición nutrimental y en los compuestos bioactivos de la semilla de *A. hypochondriacus*, es por eso que su caracterización sigue resultando interesante y da pauta a seguir investigándola. Se debe fomentar la difusión del valor nutrimental y propiedades funcionales del amaranto para un mejor aprovechamiento del producto, así como el desarrollo de técnicas y tratamientos que permitan mantener los componentes nutrimentales de la semilla. Finalmente, queda aún mucha investigación por realizar sobre las múltiples formas de consumo del amaranto, aprovechando sus propiedades funcionales y de compuestos bioactivos, para utilizarlo como ingrediente.

AGRADECIMIENTOS

La autora A. E. Peláez-Castañeda 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 para sus estudios de posgrado.

REFERENCIAS

- Abbasi, D., Rouzbehani, Y. y Rezaei, J. (2012). Effect of harvest date and nitrogen fertilization rate on the nutritive value of amaranth forage (*Amaranthus hypochondriacus*). *Animal Feed and Science Technology*, 171(1), 6-13.
- Abreu, M., Hernández, M., Castillo, A., Sampere, E. y Martín, M. (1995). Evaluación nutricional y toxicológica de dos variedades de amaranto de semillas de color negro (*A. uranguesis* y *A. maurensis*). *Revista Cubana de Alimentación y Nutrición*, 9(2), 94-99.
- Albores Palacios, R. Y. (2015). *Desarrollo de galletas tipo barritas de amaranto con camote*. Tesis de licenciatura. Instituto Politécnico Nacional. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología. Ciudad de México.
- Álvarez-Jubete, L., Arendt, E. K. y Gallagher, E. (2009). Nutritive value and chemical composition of pseudocereals as gluten-free ingredients. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 60(S4), 240-257.
- Ayala, A. V., Rivas-Valencia, P., Cortes-Espinoza, L., de la O, M., Escobedo-López, D. y Espitia-Rangel, E. (2014). La rentabilidad del cultivo de amaranto *Amaranthus Spp* en la región centro de México. *Ciencia Ergo-sum*, 21(1), 47-54.
- Ayala-Garay, A. V., Espitia-Rangel, E., Rivas-Valencia, P., Martínez-Trejo, G. y Almaguer-Vargas, G. (2016). Análisis de la cadena del valor de amaranto en México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 13(1), 87-104.
- Barba de la Rosa, A. P., Fomsgaard, I. S., Laursen, B., Mortensen, A. G., Olvera-Martínez, L., Silva-Sánchez C., ... y De León-Rodríguez, A. (2009). Amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) as an alternative crop for sustainable food production: phenolic acids and flavonoids with potential impact on its nutraceutical quality. *Journal of Cereal Science*, 49(5), 117-21.
- Barros, C. y Buenrostro, M. (1997). *Amaranto. Fuente maravillosa de sabor y salud*. (1a. ed.) México: Grijalbo.
- Becker, R., Wheeler, E. L., Lorenz, K., Stafford, A. E., Grosjean, O. K., Betschart, A. A. y Saunders, R. M. (1981). A compositional study of amaranth grain. *Journal of Food Science*, 46(4), 1175-80.
- Bello-Pérez, L. A. y Paredes-López, O. (2009). Starches of some food crops, changes during processing and their nutraceutical potential. *Food Engineering Reviews*, 1(1), 50-65.
- Bruni, R., Guerrini, A., Scalia, S., Romagnoli, C. y Sacchetti, G. (2002). Rapid techniques for the extraction of vitamin E isomers from *Amaranthus caudatus* seeds: ultrasonic and supercritical fluid extraction. *Phytochemical Analysis*, 13(5), 257-61. doi: 10.1002/pca.651
- Burisová, A., Tomasková, B., Sasinková, V. y Ebringerová, A. (2001). Isolation and characterization of the non-starch polysaccharides of amaranth seeds. *Chemical Papers*, 55(4), 254-60.
- Carne y amaranto se integran a canasta básica: AMLO. (29 de enero de 2019). La Jornada Maya. <https://www.lajornadamaya.mx/nacional/134150/Carne-y-amaranto-se-integran-a-canasta-basica--AMLO>
- Caselato-Sousa, V. M. y Amaya-Farfán, J. (2012). State of knowledge on amaranth grain: a comprehensive review. *Journal of Food Science*, 77, 93-104. doi: 10.1111/j.1750-3841.2012.02645.x
- Casique, G., Martínez, N., González, L. E. y Delano, J. P. (2014). The tissue-specific expression of genes, spanning the complete betacyanin biosynthetic pathway, is differentially induced by insect herbivory, drought and salinity stress in grain in amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*). Submitted to the EMBL/GenBank/DDJB databases.
- Castrillon-Arbeláez, P. A., Martínez-Gallardo, N. A., Avilés Arnaut, H., Tiessen, A. y Délano-Frier, J. P. (2012). Metabolic and enzymatic changes associated with carbon mobilization, utilization and replenishment triggered in grain amaranth (*Amaranthus cruentus*) in response to partial defoliation by mechanical injury or insect herbivory. *BMC Plant Biology*, 12, 163.
- Cavieres, E., Piñeira, M. B. y Negrete C. (2016). Impacto de la incorporación de harina de amaranto en las propiedades físicas y sensoriales en galletas. *Contribuciones Científicas y Tecnológicas*, 41, 41-47.
- Die, V., Torres, S., De Lumen, B. O. Erdman, L. E. y Gonzalez De Mejia, E. (2009). Presence of lunasin in plasma of men after soy protein consumption. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(4), 1260-1266. doi: 10.1021/jf803303k
- Díaz-Ortega, A. C., Escalante-Estrada, J. A., Trinidad-Santos, A., Sánchez-García, P., Mapes-Sánchez, C. y Martínez-Moreno, D. (2004). Rendimiento, eficiencia agronómica del nitrógeno y eficiencia en el uso del agua en amaranto en función del manejo del cultivo. *Terra Latinoamericana*, 22(1), 109-116.
- Dodok, L., Modhir, A. A., Buchtová, V., Halászová, G. y Polácek, I. (1997). Impor-

- tance and utilization of amaranth in the food industry. Part 2. Composition of amino acids and fatty acids. *Nahrung-Food*, 41(2), 108-110. doi: 10.1002/food.19970410211
- El Gendy, A. N. G., Tavarini, S., Conte, G., Pistelli, L., Hendawy, S. F., Omer, E. A. y Angelini, L.G. (2018). Yield and qualitative characterisation of seeds of *Amaranthus hypochondriacus L.* and *Amaranthus cruentus L.* grown in central Italy. *Italian Journal of Agronomy*, 13, 63-73. doi:10.4081/ija.2017.993
- Espitia-Rangel, E., Mapes-Sánchez, E. C., Núñez-Colín, C. A. y Escobedo-López, D. (2010). Distribución geográfica de las especies cultivadas de *Amaranthus* y de sus parientes silvestres en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1(3), 427-437.
- FAO. (2005). *The state of food insecurity in the world*. Roma: FAO.
- Gamel, T. H., Mesallam, A. S., Damir, A. A., Shekib, L. A. y Linssen, J. P. (2007). Characterization of amaranth seed oils. *Journal of Food Lipids*, 14, 323-34.
- García-González, A., Flores-Vazquez, A. L., Barba de la Rosa, A. P., Vázquez-Martínez, E. A. y Ruiz-García, J. (2013). Amaranth 7S globulin, Langmuir films and its interaction with l- α -dipalmitoylphosphatidylcholine at the air-fluid interface. *Journal of Physical Chemistry B*, 117, 14046-58. doi: 10.1021/jp405944u
- García-Ortíz, L. A. (2016). *Propuesta de innovación de una galleta como alimento funcional usando harina de amaranto*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México. Centro Universitario UAEATenancingo. Tenancingo, Estado de México.
- González, R., Tosi, E., Ré, E., Añón, M. C., Pilosof, A. M. R. y Martínez, K. (2007). Amaranth starch-rich fraction properties modified by high-temperature heating. *Food Chemistry*, 103, 927-34.
- Grobelnik-Mlakar, S., Turinek, M., Jakop, M., Bavec, M. y Bavec, F. (2010). Grain amaranth as an alternative and prospective crop in temperate climate. *Journal for Geography*, 5(1), 135-146.
- He, H. P., Cai, Y. Z., Sun, M. y Corke, H. (2002). Extraction and purification of squalene from *Amaranthus* grain. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 50, 368-72.
- Herrera, S. y Montenegro, A. (2012). El Amaranto: prodigioso alimento para la longevidad y la vida. *Kalpana*, 8, 50-66.
- Herrera-Chalé, F., Betancur-Ancona, D. y Segura-Campos, M. R. (2014). Compuestos bioactivos de la dieta con potencial en la prevención de patologías relacionadas con sobrepeso y obesidad: péptidos biológicamente activos. *Nutrición Hospitalaria*, 29(1), 10-20. doi: 10.3305/nh.2014.29.1.6990
- Hozová, B., Kuniak, L., Moravčíková, P. y Gajdošová, A. (2007). Determination of water-insoluble β -D-glucan in the whole-grain cereals and pseudocereals. *Czech Journal of Food Science*, 25(6), 316-324.
- Huang, Z. R., Lin, Y. K. y Fang, J. Y. (2009). Biological and pharmacological activities of squalene and related compounds: potential uses in cosmetic dermatology. *Molecules*, 14(1), 540-54.
- Jahaniaval, F., Kakuda, Y. y Marcone, M. F. (2000). Fatty acid and triacylglycerol composition of seed oils of five *Amaranthus* accessions and their comparison to other oils. *Journal of the American Oil Chemist's Society*, 77(8), 847-52.
- Joshi, D., Sood, S., Hosahatti, R., Kant, L., Pattanayak, A., Kumar, A. ... y Stetter, M. (2018). From zero to hero: the past, present and future of grain amaranth breeding. *Theoretical and Applied Genetics*, 131(9), 1807-1823. doi: 10.1007/s00122-018-3138-y
- Juan, R., Pastor, J., Alaiz, M., Megías, C. y Vioque, J. (2007). Seed protein characterization of eleven species of *Amaranthus*. *Grasas y Aceites* 58(1), 49-55.
- Kachiguma, N. K., Mwase, W., Maliro, M. y Damaliphetsa, A. (2015). Chemical and mineral composition of amaranth (*Amaranthus L.*) species collected from central Malawi. *Journal of Food Research*, 4(4), 92-102.
- Kaur, S., Singh, N. y Rana, J. C. (2010). *Amaranthus hypochondriacus* and *Amaranthus caudatus* germplasm: characteristics of plants, grain and flours. *Food Chemistry*, 123(4), 1227-1234.
- Lehmann, J. W., Putnam, D. H. y Qureshi, A. A. (1994). Vitamin-E isomers in grain amaranths (*Amaranthus spp.*). *Lipids* 29(3), 177-81.
- León-Camacho, M., García-González, D. L. y Aparicio, R. (2001). A detailed and comprehensive study of amaranth (*Amaranthus cruentus L.*) oil fatty profile. *European Food Research Technology*, 213 (4-5), 349-355. doi: 10.1007/s002170100340
- López-Mejía, O. A., López-Malo, A. y Palou, E. (2014). Capacidad antioxidante de subproductos de semillas de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*). *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 64(1), 50-58.
- Loubes, M. A., Calzetta Resio, A. N., Tolaba, M. P. y Suárez, C. (2012). Mechanical and

- thermal characteristics of amaranth starch isolated by acid wet-milling procedure. *LWT-Food Science and Technology*, 46(2), 519-524. doi: 10.1016/j.lwt.2011.11.015
- Mauer-Díaz, K., Exaire-Murad, J. E. y Escalante-Acosta, B. (2001). Importancia de la enzima convertidora de angiotensina (ECA) en la circulación coronaria. *Archivos de Cardiología de México*, 71(4), 278-285.
- Montes-Hernández, A. I., Oropeza-González, R. A., Padrón-Pereira, C. A., Araya-Quesada, Y., Wexler-Goering L. y Cubero-Castillo, E. (2017). Películas biodegradables con propiedades bioactivas. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 8(1), 057-089.
- Montoya-Rodríguez, A., Gómez-Favela, M., Reyes-Moreno, C., Milán-Carrillo, J. y González de Mejía, E. (2015). Identification of bioactive peptide sequences from amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) seed proteins and their potential role in the prevention of chronic diseases. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(2), 139-158. doi: 10.1111/1541-4337.12125
- Morales-Guerrero, J. C., Vázquez-Mata, N. y Bressani-Castignoli, R. (2009). *El amaranto: características físicas, químicas, toxicológicas y funcionales y aporte nutricio* (1a ed.). México: Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán.
- Mustafa, A., Seguin, P. y Gélinas, B. (2011). Chemical composition, dietary fibre, tannins and minerals of grain amaranth genotypes. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 62(7), 750-754. doi:10.3109/09637486.2011.575770
- Palma-Colindres, L. J. (2014). *Valor nutritivo y evaluación de aceptabilidad de una galleta formulada a base de trigo, amaranto y ajonjolí en niños escolares*. Tesis de licenciatura. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Guatemala.
- Pedersen, B., Kalinowski, L. S. y Eggum, B. O. (1987). The nutritive value of amaranth grain (*Amaranthus caudatus*). *Plant Foods for Human Nutrition*, 36(4), 309-324.
- Písáriková, B., Kráčmar, S. y Herzig, I. (2005). Amino acid contents and biological value of protein in various amaranth species. *Czech Journal of Food Sciences*, 50(4), 169-174.
- Raihan, M. y Saini, C. S. (2017). Evaluation of various properties of composite flour from oats, sorghum, amaranth and wheat flour and production of cookies thereof. *International Food Research Journal*, 24(6), 2278-2284.
- Ramírez-Medelz, M. C., Aguilar-Ramírez, M. B., Miguel, R. N., Bolaños-García, V. M., García-Hernández, E. y Soriano-García, M. (2003). Amino acid sequence, biochemical characterization, and comparative modeling of a nonspecific lipid transfer protein from *Amaranthus hypochondriacus*. *Archives Biochemistry and Biophysics*, 415(1), 24-33.
- Repo-Carrasco-Valencia, R., Peña, J., Kallio, H. y Salminen, S. (2009). Dietary fiber and other functional components in two varieties of crude and extruded kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Journal of Cereal Science*, 49(2): 219-224. doi: /10.1016/j.jcs.2008.10.003
- Rizzello, C. G., Coda, R., De Angelis, M., Di Cagno, R., Carnevali, P. y Gobbetti, M. (2009). Long-term fungal inhibitory activity of water-soluble extract from *Amaranthus spp.* seeds during storage of gluten-free and wheat flour breads. *International Journal of Food Microbiology*, 131(2-3), 189-96. doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2009.02.025
- Rodríguez-Rodríguez, J., Amaya, C. A., Caballero, P., Alanís, M. G., Aguilera, C., Báez, J. G., Moreno, S. y Núñez, M. A. (2015). Factores que influyen en el contenido de escualeno, fitoesteroles totales y esterificados en el subproducto ácidos grasos destilados de soya para su potencial aprovechamiento. *Nova Scientia*, 7(14), 268-285.
- Rosa, de la A. P., Herrera-Estrella, A., Utsumi, S. y Paredes-López, O. (1996). Molecular characterization, cloning and structural analysis of a cDNA encoding an amaranth globulin. *Journal Plant Physiology*, 149(5), 527-32.
- Saunders, R. M. y Becker, R. (1984). Amaranthus: a potential food and feed resource. En Y. Pomeranz, *Advances in cereal science and technology* (pp. 357-397). St. Paul, MN: American Association of Cereal Chemists.
- Silva, S., Pinheiro, A. C., Rodríguez, L., Figueiroa, V. y Baginsky, C. (2016). Fuentes naturales de fitoesteroles y factores de producción que lo modifican. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 66(1), 17-24.
- Silva-Sánchez, C., De la Rosa, A. P. B., Leon-Galván, M. F., De Lumen, B. O., De Leon-Rodríguez, A. y González de Mejía, E. (2008). Bioactive peptides in amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) seed. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(4), 1233-1240.
- Sujak, A. y Dziwulska-Hunek, A. (2010). Minerals and fatty acids of amaranth

- seeds subjected to pre-sowing electromagnetical stimulation. *International Agrophysics*, 24(4), 375-379.
- Sujak, A., Dziwulska-Hunek, A. y Kornarzynski, K. (2009). Compositional and nutritional values of amaranth seeds after pre-sowing He-Ne laser light and alternating magnetic field treatment. *International Agrophysics*, 23(1), 81-86.
- Tandang-Silvas, M. R., Cabanos, C. S., Peña, L. D. C., De La Rosa, A. P. B., Osuna-Castro, J. A., Utsumi, S. y Maruyama, N. (2012). Crystal structure of a major seed storage protein, 11S proglobulin, from *Amaranthus hypochondriacus*: insight into its physico-chemical properties. *Food Chemistry*, 135(2), 819-826. doi: 10.1016/j.foodchem.2012.04.135
- Tikekar, R. V., Ludescher, R. D. y Karwe, M. V. (2008). Processing stability of squalene in amaranth and antioxidant potential of amaranth extract. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(22), 10675-10678. doi: 10.1021/jf801729m
- Tömösközi, S., Baracskai, I., Schönlechner, R., Berghofer, E. y Lászity, R. (2009). Comparative study of composition and technological quality of amaranth I. Gross chemical composition, amino acid and mineral content. *Acta Alimentaria*, 38(3), 341-347. doi: 10.1556/AAlim.38.2009.3.8
- Torres-Merlo, O. X., Vallejos-Cazar, A. F. y Castañeda-Garzón, J. M. (2017). Productos a base de amaranto como alternativas nutricionales para la lonchera escolar y su importancia en el desarrollo infantil. *Holopraxis Ciencia, Tecnología e Innovación*, 1(2), 117-139.
- Vecchi, B. y Añón, M. C. (2009). ACE inhibitory tetrapeptides from *Amaranthus hypochondriacus* 11s globulin. *Phytochemistry*, 70(7), 864-870. doi:10.1016/j.phytochem.2009.04.006
- Velasco-Lozano, A. M. (2016). Los cuerpos divinos. El amaranto: comida ritual y cotidiana. *Arqueología Mexicana*, 138, 26-33
- Venskutonis, P. y Kraujalis, P. (2013). Nutritional components of amaranth seeds and vegetables: A review on composition, properties, and uses. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 12(4), 381-412. doi:10.1111/1541-4337.12021
- Zhelezov, A. V., Solonenko, L. P. y Zhelezova, N. B. (1997). Seed proteins of the wild and the cultivated *Amaranthus* species. *Euphytica*, 97(2), 177-182.



Combinación de luz ultravioleta de onda corta (UVC)

con otras tecnologías como tratamientos de pasteurización de alimentos líquidos

D. L. Gómez-Sánchez*, N. Ramírez-Corona y A. López-Malo

*Trabajo de investigación de la Licenciatura en Ingeniería Química
Correo electrónico: nelly.ramirez@udlap.mx

RESUMEN

Durante las últimas décadas se han estudiado diferentes tecnologías emergentes para el procesamiento de alimentos líquidos con el fin de evitar los tratamientos térmicos que tienen la desventaja de modificar los atributos sensoriales del producto. Una tecnología aceptada actualmente por la FDA es el uso de luz ultravioleta de onda corta (uvc) que ha demostrado efectos esterilizantes en muchos productos líquidos; sin embargo, debido a las características particulares de cada fluido (alimento líquido), en especial en presencia de sólidos suspendidos, no se logra tener un aprovechamiento total de la luz uvc. Varios investigadores, por tanto, han buscado combinar esta tecnología con otras, tales como temperaturas moderadas, campos eléctricos pulsados, tratamientos químicos y ultrasonido, con el fin de mejorar la eficacia de los procesos. En esta revisión se presenta una comparación de la efectividad del uso de radiación uvc en combinación con otras tecnologías, sobre la inactivación de diversos microorganismos presentes en alimentos líquidos, discutiendo la existencia de efectos aditivos y/o sinérgicos durante los diferentes tratamientos.

Palabras clave: radiación uvc, tecnologías combinadas, alimentos líquidos.

ABSTRACT

During the last decades, the effectiveness of different emerging technologies for liquid foods processing have been studied, in order to avoid heat treatments that may alter the organoleptic properties of the product. Currently, a new technology accepted by the FDA is the use of short-wave ultraviolet light (uvc) that has showed sterilizing effects on many food products, however, due to the particular characteristics of each fluid in liquid foods, particularly the presence of suspended solids, it is not possible to have a full use of uvc light. Several researchers have therefore attempted to combine this technology with others such as mild temperatures, pulsed electric fields, chemical treatments and ultrasound in order to improve process performances. This review presents a comparison of the effectiveness of uvc radiation in combination with other technologies, on the inactivation of several microorganisms present in liquid foods, discussing the existence of additive and / or synergistic effects during the different treatments

Keywords: short wave ultraviolet radiation, combined technologies, liquid foods.

INTRODUCCIÓN

La radiación ultravioleta es una fuente ya muy conocida por sus efectos esterizadores, germicidas y de desinfección para superficies inertes, frutas, verduras y algunos productos líquidos transparentes como el agua (Bintsis, Litopoulou-Tzanetaki y Robinson, 2000). En estos casos se utiliza una longitud de onda corta de 254 nm, comúnmente llamada uvc. La radiación uvc para el uso en productos líquidos ha sido ampliamente estudiada y es de manejo versátil, ya que se puede variar la dosis ya sea aumentando el tiempo de exposición y reduciendo la intensidad, o disminuyendo el tiempo de exposición y aumentando la intensidad (Koutchma, Forney y Moraru, 2009).

Esta tecnología tiene un efecto antimicrobiano debido a que al absorber la radiación las células microbianas presentan una ruptura de ciertos enlaces en su ADN, específicamente entre timinas y citosinas que comprometen su reproducción y conducen a su muerte debido a la imposibilidad de realizar una correcta transcripción y replicación del ADN (Guerrero-Beltrán y Barbosa-Cánovas, 2011). Su amplia aplicación se debe a una relativa facilidad de uso, es un tratamiento no térmico y no genera residuos; sin embargo, su poder de penetración es bajo y, por lo tanto, se encuentra con limitantes cuando los líquidos contienen sólidos suspendidos o no son lo suficientemente traslúcidos (Koutchma, Parisi y Patazca, 2007). Debido a ello se ha buscado combinar con otras tecnologías con la finalidad de mejorar el efecto de la luz ultravioleta sobre los microorganismos. La combinación de tecnologías pretende reducir las desventajas que tienen estas al utilizarse de manera individual, logrando que en conjunto exista una múltiple inactivación de microorganismos gracias al aumento de los factores involucrados, garantizando al mismo tiempo la seguridad alimentaria y la aceptación sensorial (Leistner y Gorris, 1995).

Los alimentos líquidos son de fácil manejo, lo cual permite la aplicación de varios tratamientos a la vez o de manera secuencial. Sin embargo, cuando se utilizan de manera secuencial, es importante considerar el orden de aplicación de dichos tratamientos en su efectividad total, es decir que, si se busca combinar un tratamiento de radiación uvc con otra tecnología, será importante saber si los dos tratamientos son aditivos entre ellos

o si son sinérgicos. En el primer caso el orden de los tratamientos no afecta el resultado final en el procesamiento del producto y su efecto total es la suma de ambos; en el segundo caso sí importará la configuración de los equipos y la secuencia del tratamiento, es decir, si se procesa el alimento primero con la radiación uvc y luego con otra tecnología o viceversa, puesto que esto afectará al resultado final en términos de la inactivación de microorganismos, esperando un efecto total mayor que la suma de los efectos individuales (Wang *et al.*, 2011). Otro aspecto importante a considerar durante la combinación de tecnologías es la evaluación de los diferentes factores que pueden influir en la efectividad del proceso, tales como la turbidez, la viscosidad y la densidad del líquido, los sólidos suspendidos presentes, los caudales manejados, el área de exposición, la capacidad de absorción de luz uvc, entre otros factores.

La presente revisión bibliográfica está enfocada en la comparación de la efectividad del uso de diferentes tecnologías, tanto tradicionales como emergentes, en combinación con la radiación ultravioleta de onda corta sobre la inactivación de diversos microorganismos presentes en alimentos líquidos.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. Luz ultravioleta de onda corta (uvc)

La luz ultravioleta de onda corta (uvc) es una tecnología que ofrece una alternativa a los tratamientos térmicos para el procesamiento de alimentos líquidos, pues, dado que no eleva significativamente la temperatura del producto, suele conservar los nutrientes y la percepción sensorial original que los consumidores buscan (López-Malo y Palou, 2005). A pesar de las múltiples aplicaciones y ventajas del uso de la radiación ultravioleta de onda corta, existen limitaciones que no permiten alcanzar las 5 reducciones logarítmicas de la población microbiana en ciertos alimentos líquidos que requiere la FDA (2000).

La limitación más importante suele ser la opacidad del producto, debido a la baja penetración de la radiación. Por lo tanto, durante el diseño de equipos uvc se busca que la luz se encuentre lo más cerca posible del medio a tratar, en caso de no ser posible, se sugiere incrementar la turbulencia en el flu-

jo para homogeneizar la radiación recibida (Koutchma, Keller, Chirtel y Parisi, 2004). A pesar de recomendaciones como esta, dado que no todos los productos líquidos son transparentes, resulta interesante buscar la combinación de otros métodos para mejorar la efectividad de los tratamientos uvc.

2. Combinación de radiación ultravioleta con tecnologías tradicionales

2.1. Tratamientos térmicos

La combinación de luz uvc con tratamientos térmicos ha sido una de las tecnologías combinadas más estudiadas, pues suele mostrar buenos resultados en la reducción lineal logarítmica de los microorganismos a tratar. Gayan *et al.* (2012) evaluaron esta combinación directamente en caldos de cultivo de soya triptona con *Salmonella enterica*, usaron 8 lámparas uvc de 8W, cada una distribuida en ocho reactores con capacidad de 56.2 ± 2.4 mL en los que se varió la radiación de uvc entre 12.8 y 18.0 J/mL. Para la combinación con el tratamiento térmico, todos los reactores fueron sumergidos en un baño con temperaturas de 45 a 60 °C. Los autores obtuvieron resultados de 0.5 reducciones logarítmicas para el tratamiento de luz uvc y de 2.3 reducciones logarítmicas para el tratamiento de luz uvc combinado con baños a 55 °C, siendo este último su mejor resultado.

Gouma *et al.* (2015) realizaron un tratamiento similar al presentado por Gayán *et al.* (2012), pero evaluando el efecto de la combinación de uvc con calor sobre levaduras inoculadas en jugo de manzana comercial. Este experimento se desarrolló utilizando una dosis de uvc de 2.9 J/mL, se observaron mejores resultados con una combinación a una temperatura de 55 °C, teniendo como resultado una reducción logarítmica de 0.3 para el tratamiento con uvc y de 1.3 para el tratamiento combinado. En ambos estudios se concluyó que el pH no influye en la inactivación con luz uvc, con esta temperatura ambos reportan una sinergia entre tratamientos pues, en ambos casos, se observa que el incremento de temperatura sensibiliza al microorganismo a la luz uvc y se logra reducir la población microbiana en más de 1 log en tan solo 2.7 minutos de tratamiento.

En el estudio realizado por Gabriel *et al.* (2018) se combinó una lámpara uvc (15 W de potencia a una distancia del líquido

de 21.1 cm, logrando una dosis de entre 17.30 y 25.26 mJ/cm²), con rangos de exposición de 50 a 125 segundos. El tratamiento térmico se realizó a diferentes temperaturas (55, 57, 60 y 63 °C) para diferentes microorganismos inoculados en endospermo líquido de coco o agua de coco comercial. Los mejores resultados se obtuvieron a una temperatura de 55 °C, alcanzando más de 5 reducciones logarítmicas para los diferentes microorganismos probados, a pesar de que los patógenos muestran una mayor resistencia al tratamiento térmico. Las reducciones logarítmicas puntuales de cada microorganismo se resumen en la tabla I con el fin de compararlos con los resultados reportados en otros trabajos.

García, Ferrairo y Guerrero (2018) trataron jugo de naranja con zanahoria inoculado con la levadura *Saccharomyces cerevisiae* con dos lámparas uvc (30 W) conectadas en serie dentro de un tubo de vidrio, lo cual corresponde a una radiación de 10.6 kJ/m². El jugo fue irradiado en rangos de tiempo de 0 a 15 minutos en una cámara provista de recirculación para mantener la temperatura en 20 o 50 °C. Durante estos experimentos se monitoreó la integridad de las membranas celulares de la levadura, en donde se encontró que la combinación de tratamientos hace daños subletales como alteraciones en la coagulación y vacuolización de la célula. Se observó que el tratamiento daña las paredes celulares, causando una deformación de estas, lo cual provoca daños estructurales que no se observan en los tratamientos aislados. Dichos autores obtuvieron 2.6 reducciones logarítmicas con radiación uvc a 20 °C y 4.7 reducciones con los tratamientos a 50 °C, lo cual indica del efecto aditivo de estas dos tecnologías.

En general, varios autores reportan una mayor inactivación de los microorganismos probados cuando se combina el tratamiento uvc con tratamientos térmicos a temperaturas de 50 a 55 °C. En la tabla I se presenta una comparación de los resultados obtenidos por diferentes autores para la combinación del uso de radiación uvc con tratamientos térmicos.

2.2. Adición de antimicrobianos

La adición de otro componente busca que el medio en donde se encuentran los microorganismos deje de ser apto para su supervivencia; sin embargo, cuando se trata de medios ácidos como

Tabla I. Comparativo de luz ultravioleta de onda corta (UVC) en combinación con tecnologías tradicionales

| Tecnología combinada | Medio/ alimento | Microorganismo | Dosis | | Reducción logarítmica | | Referencia | | |
|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-------------------|--|--|--|
| | | | UVC | Tecnología en combinación | UVC | UVC + combinación | | | |
| Temperatura media | Caldo de soya triptona adaptada | <i>Salmonella enterica</i> | 12.8-18.0 J/mL | Baño de agua a 55 °C | 0.5 | 2.3 | Gayá <i>et al.</i> , 2012 | | |
| | | <i>Saccharomyces cerevisiae</i> | 2.9 J/mL | | 0.3 | 1.3 | Gouma <i>et al.</i> , 2015 | | |
| | Endospermo líquido de coco | <i>Escherichia coli</i> | 0.2526 kJ/m ² | | 1.82 | 5.94 | Gabriel <i>et al.</i> , 2018 | | |
| | | <i>Salmonella enterica</i> | 0.173 kJ/m ² | | 0.16 | 5.62 | | | |
| | | <i>Listeria monocytogenes</i> | 0.2465 kJ/m ² | | 2.02 | 6.20 | | | |
| | Jugo de naranja con zanahoria | <i>Saccharomyces cerevisiae</i> | 10.6 kJ/m ² | Baño de agua a 50 °C | 2.6 | 4.7 | García, Ferrairo y Guerrero, 2018 | | |
| Adición de antimicrobiano | Néctar de durazno | <i>Aspergillus flavus</i> | 203 kJ/m ² | 1000 ppm benzoato de sodio | 2.8 | 3.2 | Flores-Cervantes, <i>et al.</i> , 2013 | | |
| | | <i>Aspergillus niger</i> | | | 1.5 | 2.9 | | | |
| | Dongchimi | Bacterias aerobias | 6 kJ/m ² | 0.1 % extracto de semilla de uva | 1.66 | 3.06 | Choi <i>et al.</i> , 2017 | | |
| | | Bacterias ácido-lácticas | | | 2.44 | 3.3 | | | |
| | | Levaduras y hongos | | | 1.74 | 2.27 | | | |
| Adición de desinfectante | Arándanos | <i>Salmonella enterica</i> | 27.6-33.6 kJ/m ² | 8 ppm cloro | 1.72 ± 0.06 | 2.52 ± 0.10 | Huang, Vries y Chen, 2018 | | |
| | | | | 2 % H ₂ O ₂ | | 2.01 ± 0.27 | | | |
| | | | | 80 ppm PPA | | 2.60 ± 0.16 | | | |
| | Zanahoria cortada | | | 8 ppm cloro | 1.99 ± 0.22 | 3.40 ± 0.69 | | | |
| | | | | 2 % H ₂ O ₂ | | 1.93 ± 0.31 | | | |
| | | | | 80 ppm PPA | | 3.65 ± 0.78 | | | |

los jugos, también existe una resistencia mayor de los microorganismos al tratamiento con aditivos. Flores-Cervantes, Palou y López-Malo (2013) adicionaron como antimicrobianos sorbato de potasio y benzoato de sodio en concentraciones de 250 a 2,000 ppm a un néctar de durazno inoculado con diferentes hongos, *Aspergillus flavus* y *Aspergillus niger*. El néctar fue irradiado con luz uvc en dosis máximas de 203 kJ/m² en diferentes momentos del tratamiento; los resultados mostraron que la combinación uvc-benzoato de sodio (1,000 ppm) provocó hasta 3 reducciones logarítmicas, específicamente con el antimicrobiano adicionado después del tratamiento de radiación y un caudal de proceso de 1.4 L/min. Los resultados únicamente con adición de benzoato de sodio mostraron una reducción logarítmica cercana a 2.6, mientras que la simple irradiación de uvc provocó reducciones logarítmicas de 2.8 y 1.5 para *A. flavus* y *A. niger*, respectivamente.

Choi, Park, Yang y Chun (2017) adicionaron un antimicrobiano proveniente del extracto de semillas de uvas (GSE, por sus siglas en inglés) a un caldo tradicional de China (*dongchimi*). Durante el tratamiento el caldo fue irradiado con 4 lámparas uvc de 20 W, cada una a una distancia de 15 cm, posterior a esto se disolvió el extracto en el caldo a diferentes concentraciones. Estos autores encontraron que la mejor combinación de uvc-GSE se obtiene al utilizar una dosis de 6 kJ/cm² de radiación uvc y al adicionar 0.1 % del extracto, aumentando las reducciones logarítmicas de diferentes tipos de bacterias y le-
vaduras de un rango de 1.66-2.44 a rangos de 2.27-3.3. En este estudio se concluyó que la adición de antimicrobianos es más efectiva después de que el alimento ha sido irradiado con uvc, lo cual es consistente con lo reportado por Flores-Cervantes, Palou y López-Malo (2013).

Huang, Vries y Chen (2018) evaluaron la adición de agentes desinfectantes como cloro, peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y ácido peroxiacético (PPA). Estos autores realizaron sus experimentos con diferentes verduras sumergidas en caldos inoculados con *Salmonella entérica*, la fuente de luz uvc fue provista por cuatro lámparas de 90 cm y 265 W, cada una a 17 cm de distancia de la mezcla a tratar (dosis de 27.6-33.6 kJ/m²). Los resultados muestran que la adición de agentes desinfectantes o antimicrobianos resulta en una mejoría del proceso y que el tratamiento puede ser utilizado indirectamente para

alimentos sólidos. En la tabla I se muestran únicamente los resultados para el tratamiento con arándanos frescos y zanahoria cortada, en los que se observa que el cloro y el PPA en concentraciones de 8 ppm y 80 ppm, respectivamente, son de los desinfectantes más efectivos, y en combinación con uvc logran reducir la población microbiana de *S. entérica* en más de 2.5 ciclos logarítmicos.

3. Combinación de radiación ultravioleta con tecnologías emergentes

Durante los últimos años diversos investigadores han evaluado métodos alternativos a los tratamientos térmicos, o bien a la adición de agentes germicidas, considerados la tecnología convencional más utilizada, con la finalidad de minimizar el cambio en las propiedades nutricionales y organolépticas de los alimentos tratados. Estas tecnologías, conocidas como tecnologías emergentes, incluyen el uso de fuentes de energía como luz ultravioleta, ultrasonido, pulsos eléctricos, pulsos de luz, microondas, o bien la combinación de dos o más de estos tratamientos, siendo los más efectivos el uso de luz ultravioleta, pulsos eléctricos y ultrasonido. En la siguiente sección se discutirán algunos resultados de la efectividad de tratamientos combinados al utilizar uvc con otras tecnologías emergentes.

3.1. Campos eléctricos pulsados

Una alternativa de combinación de tratamientos es el uso de campos eléctricos pulsados (PEF, por sus siglas en inglés), un tratamiento no térmico que tiene un mecanismo de inactivación que provoca daños celulares irreversibles por la formación de poros en la membrana celular de microorganismos deterioradores o patógenos presentes en alimentos, fenómeno llamado electroporación (Hamilton y Sale, 1967).

Gachovska *et al.* (2008) realizaron experimentos con jugo de manzana inoculado con *Escherichia coli* en el cual se alcanzaron las mayores reducciones con campos eléctricos de 162 J/mL y 11.3 pulsos, junto con un tratamiento de luz uvc con una lámpara de longitud de 30 cm y un tiempo de exposición de 2.94 segundos (caudal de 8 mL/min).

Noci *et al.* (2008) trataron la flora microbiana nativa de un jugo de manzana fresco con una potencia de 30 W de luz uvc a 30 cm del jugo y 100 pulsos de 15 Hz y 1 μ s, con un

caudal del líquido de 15.75 mL/min (tiempo de residencia de 6.67 segundos). Dichos autores reportaron reducciones logarítmicas mayores a 5 sin importar el orden para realizar el tratamiento, mientras que el solo uso de la luz uvc tuvo reducciones de 2 a 3.5 log.

Palgan *et al.* (2011) también realizaron combinaciones con este tipo de tecnologías, en donde utilizaron campos eléctricos pulsados de 18 Hz por un pulso de 1 μ s. El jugo de manzana y arándano utilizado, inoculado con *E. coli* o *Pichia fermentans*, se procesó a una temperatura de 20 °C con un flujo de 20.8 mL/min y se expuso a un campo eléctrico de 34 kV/cm por 93 μ s. El flujo volumétrico dentro de la lámpara uvc fue de 176 mL/min con un tiempo de residencia de 30 segundos dentro de la unidad. Después de su tratamiento, los investigadores alcanzaron resultados cercanos a 6 reducciones logarítmicas, sin que el orden de los tratamientos afectara este valor. Como puede observarse, la combinación de PEF-UVC muestra efectos aditivos, mas no sinérgicos entre ellos.

3.2. Ultrasonido

El ultrasonido (us), al igual que los campos eléctricos pulsados, ha sido considerado como método emergente y no térmico para el tratamiento de alimentos líquidos. Su mecanismo de inactivación consiste en la formación, evolución y posterior implosión de burbujas y microburbujas en el proceso, debido al fenómeno de cavitación que produce y que por consecuencia provoca daño celular (Knorr, Zenker, Heinz y Lee, 2004).

Autores como Char, Mitilinaki, Guerrero y Alzamora (2010), Palgan *et al.* (2011) y Antonio-Gurierrez, López-Malo, Ramírez-Corona y Palou (2017) han reportado un efecto sinérgico entre los tratamientos de luz ultravioleta junto con el uso de ultrasonido, en los cuales se alcanzan desde 2 hasta 6 reducciones logarítmicas.

Char, Mitilinaki, Guerrero y Alzamora (2010) evaluaron el efecto de combinar uvc con us durante el tratamiento de jugo de naranja inoculado con *E. coli*, encontrando un efecto sinérgico cuando se irradió primeramente el jugo (utilizando una lámpara

uvc, 90 cm de 100 W) por períodos de 5 a 20 minutos y posteriormente se utilizó un ultrasonido (20 kHz con amplitud de 95 μ m) con un flujo de 0.2 L/min. Dichos autores obtienen reducciones logarítmicas de *E. coli* cercanas a 1.8 y 1.9 con los tratamientos individuales de uvc y us respectivamente, y una reducción muy similar cuando realizan el tratamiento consecutivo uvc-us. Sin embargo, al realizar los dos tratamientos de forma simultánea, logran aumentar las reducciones logarítmicas hasta 3.5, demostrando una sinergia entre ambos.

Palgan *et al.* (2011) evaluaron el efecto de ambas tecnologías (uvc y us) para el tratamiento de jugo de manzana y arándano inoculado con *E. coli* o *Pichia fermentans*. Dado que el ultrasonido provoca aumento de temperatura en la muestra, el jugo se mantuvo en un baño de -15 °C para ser tratado con un ultrasonido de 20 kHz con una amplitud de 23 μ m y 750 W de potencia. La dosis de energía de la lámpara uvc con una potencia de 30 W fue de 5.3 J/cm² para un flujo de 176 mL/min con un tiempo de residencia de 30 segundos dentro de la unidad. Al combinar ambas tecnologías se observaron reducciones logarítmicas mayores a 6 para los 2 microorganismos probados.

Antonio-Gutiérrez, López-Malo, Ramírez-Corona y Palou (2017) evaluaron el efecto de la atomización ultrasónica (20 kHz al 100 % de amplitud) en combinación con luz uvc, para el tratamiento de jugos de toronja y mandarina comercial inoculados con *S. cerevisiae*. Los jugos tratados fueron bombeados y atomizados por el us directamente a la luz uvc a una velocidad de 1.1 mL/s y procesado 3 veces. Los autores evaluaron 6 configuraciones con lámparas uvc de 35 cm de largo y diferentes espacios anulares entre la lámpara y la carcasa de acero inoxidable, evaluando también la conveniencia de utilizar o no dicha carcasa. El arreglo más efectivo se obtuvo al utilizar la lámpara dentro de la carcasa de acero inoxidable con el espacio anular más grande (5 cm de diámetro), logrando una mayor superficie de contacto de las moléculas atomizadas con el ultrasonido, además de mejorar la distribución de la luz uvc gracias al reflejo. Como resultado en esta última

configuración se obtuvieron casi 3 reducciones logarítmicas de *S. cerevisiae*, mientras que los otros arreglos alcanzaban un máximo de 1.5 reducciones.

En la tabla II se muestra un resumen de estas tecnologías combinadas, se observa que la combinación tanto de ultra-

sonido como de campos eléctricos pulsados junto con la luz UVC da mejores resultados en cuanto a la reducción de población microbiana. Sin embargo, cabe destacar que para los casos con mayor inactivación los tiempos de radiación continúan siendo altos (de 20 a 30 minutos de exposición).

Tabla II. Comparativo de luz ultravioleta de onda corta en combinación con tecnologías emergentes

| Tecnología combinada | Medio | Microorganismo | Dosis | | Reducción logarítmica | | Referencia |
|----------------------------|----------------------------|---------------------------------|----------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------|--|
| | | | UVC | Tecnología en combinación | UVC | UVC + combinación | |
| Campos eléctricos pulsados | Jugo de manzana | <i>Escherichia coli</i> | 30 cm* | 60 kV/cm | 3.46 | 5.33-5.35 | Gachovska <i>et al.</i> , 2008 |
| | Jugo de manzana fresco | Flora microbiana nativa | 30 min* | 40 kV/cm | 2.2 | 6.2-7.1 | Noci <i>et al.</i> , 2008 |
| | Jugo de arándano y manzana | <i>Escherichia coli</i> | 53 kJ/m ² | 34 kV/cm | 1.9 | 6.1 | Palgan <i>et al.</i> , 2011 |
| | | <i>Pichia fermentans</i> | | | 1.8 | 6.0 | |
| Ultrasonido | Jugo de naranja | <i>Escherichia coli</i> | 20 min* | 20 kHz | 1.8 | 3.5 | Char <i>et al.</i> 2010 |
| | Jugo de arándano y manzana | <i>Escherichia coli</i> | 53 kJ/m ² | 20 kHz | 1.9 | 6.1 | Palgan <i>et al.</i> , 2011 |
| | | <i>Pichia fermentans</i> | | | 1.8 | 6.0 | |
| | Jugo de toronja | <i>Saccharomyces cerevisiae</i> | 3.13 J/mL | 20 kHz | 0.23 ± 0.02 | 2.77 ± 0.08 | Antonio-Gutiérrez <i>et al.</i> , 2017 |
| | Jugo de mandarina | | | | 0.35 ± 0.11 | 2.88 ± 0.02 | |

*No se reporta dosis.

4. Factores que afectan en la combinación de tecnologías con la radiación uvc

De la revisión presentada se observa que todos los tratamientos siguen siendo dependientes de las características del fluido, sobre todo en factores de absorbancia y turbidez. Como se discutió a lo largo de la presente revisión, cuando los medios que utilizan los diferentes autores presentan una mayor turbidez y absorbancia (jugos de naranja, zanahoria, mandarina y néctar de durazno), la inactivación que se puede lograr es menor que los casos en los que se trabaja con medios que tienen una menor absorbancia y turbidez (jugos de arándano, manzana y agua de coco). Este resultado es debido a que a mayor turbidez existe una menor transmitancia de la luz (Koutchma, Forney y Moraru, 2009), es decir, que la opacidad del producto se torna en una protección al microorganismo al que se quiere eliminar y afecta el aprovechamiento de la radiación ultravioleta. Si bien las características ópticas del jugo continúan siendo una limitante, las condiciones de procesamiento tales como velocidad y régimen de flujo, espesor de la película a tratar, intensidad de la radiación y configuración del equipo pueden contribuir a mejorar el área de contacto de la luz con el líquido y la penetración de la radiación a través de este.

Por otro lado, se ha observado que la efectividad de la luz uvc se puede mejorar cuando se combina con otras tecnologías, particularmente cuando actúan de manera sinérgica. En muchos casos los autores mencionan una mejoría del proceso si la aplicación de la tecnología alternativa, ya sea tradicional o emergente, se realiza después de la radiación de la muestra. Esto puede deberse a los mecanismos de acción a niveles de ADN que provoca la luz ultravioleta; una vez que la radiación uvc ha causado rupturas en los enlaces del ADN, la posterior exposición de los microorganismos a otra tecnología, como la adición de componentes antimicrobianos (o desinfectantes), o bien el uso de calor, ultrasonido o PEF, daña aún más a las células gracias a sus mecanismos de inestabilización celular. En el caso particular de los PEF combinados con el uvc, se observa que el orden de los procesos no afecta en el rendimiento del tratamiento, proba-

blemente debido a que el daño por la electroporación, así como el daño a nivel de ADN, es efectivo solo para aquellas células sanas, por lo que el deceso de los microorganismos es el mismo sin importar si la electroporación se hace previa o posteriormente al daño causado por la luz uvc.

CONCLUSIONES

El uso de luz uvc ha sido estudiado en los últimos años como una alternativa no térmica para el procesamiento de alimentos líquidos, particularmente para jugos de frutas inoculados con diferentes microorganismos de interés. Las dosis reportadas en los diferentes trabajos varían desde los 0.1 a los 203 kJ/m², de 2 a 18 J/mL y de 20 a 30 minutos de exposición, algunos autores reportan que es posible obtener buenos resultados con dosis bajas. Sin embargo, su aplicación se encuentra limitada por las propiedades ópticas del alimento a procesar, ya que la presencia de sólidos suspendidos y/o componentes colorantes puede reducir significativamente el correcto aprovechamiento de la radiación ultravioleta. Con la finalidad de incrementar el efecto de la luz uvc, o aprovechar más un factor de inactivación de manera simultánea, se ha evaluado la combinación de diferentes tecnologías junto con la uvc. Si bien es difícil comparar los tratamientos en términos de dosis recibidas, ya que depende de diferentes factores como el tipo de lámpara, arreglo, tiempo de residencia, espesor de película, etc., queda claro que la combinación de tratamientos mejora la eficiencia en la inactivación de diferentes microorganismos que deterioran los alimentos líquidos, particularmente en aquellos casos en los que se observan efectos sinérgicos, como la combinación de UVC con PEFs.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) por el apoyo y el financiamiento.

REFERENCIAS

- 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.
- Bintsis, T., Litopoulou-Tzanetaki, E. y Robinson, R. K. (2000). Existing and potential applications of ultraviolet light in the food industry: A critical review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80(6), 637-645.
- Caminiti, I. et al. (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.
- Char, C. D., Mitilinaki, E., Guerrero, S. N. y Alzamora, S. M. (2010). Use of high-intensity ultrasound and uv-c light to inactivate some microorganisms in fruit juices. *Food Bioprocess Technology*, 3(6), 797-803.
- Choi, E. J., Park, H. W., Yang, H. S. y Chun, H. H. (2017). Effects of combined treatment with ultraviolet-c irradiation and grape seed extract followed by supercooled storage on microbial inactivation and quality of dongchimi. *LWT-Food Science and Technology*, 85(A), 110-120.
- FDA (Food Drug Administration). (2000). 21 CFR Part 179: irradiation in the production, processing and handling of food.
- Flores-Cervantes, D. X., Palou, E. y López-Malo, A. (2013). Efficacy of individual and combined uvc light and food antimicrobial treatments to inactivate *Aspergillus flavus* or *A. niger* spores in peach nectar. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 20, 244-252.
- Gabriel, A. A., Ostonal, J. M., Cristobal, J. O., Pagal, G. A. y Armada, J. V. E. (2018). Individual and combined efficacies of mild heat and ultraviolet-c radiation against *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica*, and *Listeria monocytogenes* in coconut liquid endosperm. *International Journal of Food Microbiology*, 277, 64-73.
- Gachovska, T. K., Kumar, S., Thippareddi, H., Subbiah, J. y Williams, F. (2008). Ultraviolet and pulsed electric field treatments have additive effect on inactivation of *E. coli* in apple juice. *Journal of Food Science*, 73(9), 412-417.
- García, M. G., Ferrairo, M. y Guerrero, S. (2018). Effectiveness of uv-c light assisted by mild heat on *Saccharomyces cerevisiae* KE 162 inactivation in carrot-orange juice blend studied by flow cytometry and transmission electron microscopy. *Food Microbiology*, 73, 1-10.
- Gouma, M., Gayán, E., Raso, J., Condón, S. y Álvarez, I. (2015). Inactivation of spoilage yeasts in apple juice by uv-c light and in combination with mild heat. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 32, 146-155.
- Guerrero-Beltrán, J. A. y Barbosa-Cánovas, G. V. (2011). Ultraviolet-c light processing of liquid food products. En H.Q. Zhang, G.V. Barbosa-Cánovas, V. M. Balasubramaniam, C. P. Dunne, D.F. Farkas, J.T.C. Yuan, *Nonthermal Processing Technologies for Food* (1a Ed., 262-270). Inglaterra: Wiley-Blackwell and IFT Press.
- Hamilton, W. A. y Sale, A. J. H. (1967). Effects of high electric fields on microorganisms. II. Mechanism of action of the lethal effect. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)*, 148(3), 789-800.
- Huang, R., de Vries, D. y Chen, H. (2018). Strategies to enhance fresh produce de-contamination using combined treatments of ultraviolet, washing and disinfectants. *International Journal of Food Microbiology*, 283, 37-44.
- Knorr, D., Zenker, M., Heinz, V. y Lee, D. U (2004). Applications and potential of ultrasonics in food processing. *Trends in Food Science and Technology*, 15(5), 261-266
- Koutchma, T., Keller, S., Chirtel, S. y Parisi, B. (2004). Ultraviolet disinfection of juice products in laminar and turbulent flow reactors. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 5(2), 179-189.
- Koutchma, T. N., Forney, L. J. y Moraru, C. I. (2009). *Ultraviolet Light in Food Technology Principles and Applications* (1a ed.). Florida: CRC Press.
- Koutchma, T. N., Parisi, B. y Patazca, E. (2007). Validation of uv coiled tube reactor for fresh juices. *Journal of Environmental Sciences*, 6(3), 319-328.
- Leistner, L. y Gorris, L. (1995). Food preservation by hurdle technology. *Trends in Food Science & Technology*, 6(2), 41-46.
- López-Malo, A. y Palou, E. (2005). Ultraviolet light and food preservation. En Barbosa-Cánovas, G. V., Tapia, M. S. y Cano, M. P., *Novel Food Processing Technologies*. (1a ed., 405-422). Madrid: CRC Press
- Noci, F., Riener, J., Walkling-Ribeiro, M., Cronin, D. A., Morgan, D. J. y Lyng, J. G. (2008). Ultraviolet irradiation and pulsed electric fields (PEF) in a hurdle strategy for the preservation of fresh apple juice. *Journal of Food Engineering*, 85, 141-146.
- Palgan, I., Caminiti, I. M., Muñoz, A., Noci, F., Whyte, P., Morgan, D. J., ... y Lyng, J. G. (2011). 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.
- Wang, S., Meckling, K. A., Marcone, M. F., Kakuda, Y. y Tsao, R. (2011). Synergistic, additive, and antagonistic effects of food mixtures on total antioxidant capacities. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(3), 960-968.

vol
14

Carta editorial

VOL.14

Estimadxs lectorxs y autorxs,

Me complace darles la bienvenida a este volumen de nuestra revista, una plataforma dedicada a mostrar las investigaciones y los conocimientos innovadores de nuestrxs estudiantes en el campo de la ciencia y la tecnología de los alimentos. A medida que continuamos fomentando un entorno de excelencia académica, nuestra misión es publicar artículos que no solo contribuyan al conjunto de conocimientos existentes, sino que también inspiren a la próxima generación de investigadorxs y profesionales.

Esta revista emplea un riguroso proceso de revisión para garantizar los más altos estándares de calidad e integridad en nuestras publicaciones. En el consejo editorial (a quienes agradezco profundamente su labor) contamos con expertxs en el campo para evaluar y brindar comentarios constructivos sobre los envíos, pues nuestro objetivo es mejorar la experiencia educativa de nuestrxs estudiantes, así como asegurar la credibilidad de la información presentada.

En este número encontrará una variedad diversa de artículos que cubren temas como la aplicación de aceites esenciales en alimentos, el uso de gomas naturales en la microencapsulación de pigmentos, la modificación de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica, la obtención de compuestos bioactivos y enzimas a partir de la fermentación de algas, los oleogelos basados en biopolímeros como sustitutos de lípidos, así como diversos métodos de sanitización de semillas para consumo directo y germinados. Cada contribución refleja el arduo trabajo y la dedicación de nuestrxs estudiantes y de sus mentorxs, cuyos esfuerzos de investigación son cruciales para ampliar los límites de la ciencia y tecnología de alimentos.

Les invito a explorar los artículos de esta revista y a considerar cómo podrían aplicarse a su propia investigación o práctica profesional. Estamos orgullosos de ofrecer una plataforma que resalta las voces de estudiantes y promueve la colaboración entre disciplinas. Gracias por su continuo apoyo a nuestra revista *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos* (TSIA). Esperamos recibir sus comentarios y sugerencias para continuar mejorando.

Atentamente,

Enrique Palou

Profesor investigador

Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental

UDLAP

Alcances y limitaciones de la **aplicación de aceites esenciales en alimentos**

S. L. Recio-Cázares*, A. López-Malo y E. Palou

*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos
Correo electrónico: scarlette.reciocs@udlap.mx • enrique.palou@udlap.mx

RESUMEN

En los últimos años, la creciente demanda de productos más parecidos a los naturales por parte de los consumidores ha promovido el uso de aceites esenciales (AE) en la industria alimentaria como aditivos, suplementos, insecticidas y sanitizantes. Se han estudiado distintos métodos de aplicación de AE en alimentos, sin embargo, un factor importante para su uso industrial es el efecto de estos en los atributos sensoriales, por lo que actualmente, muchas investigaciones están centradas en los métodos que permitan su incorporación en alimentos, buscando la aceptación del consumidor. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es la recopilación de literatura actual donde se mencionen los métodos de aplicación de AE, describiendo sus fundamentos, ventajas y desventajas, y especialmente su efecto en los atributos sensoriales. Además, se abordarán nuevos usos de los AE en industrias relacionadas con la cadena de producción de alimentos.

Palabras clave: aceites esenciales, métodos de aplicación, conservadores naturales, atributos sensoriales.

ABSTRACT

In recent years, a growing demand for more natural-like products by consumers has promoted the use of essential oils (EOS) in the food industry as additives, food supplements, insecticides, and sanitizers. Different methods of applying EOS in food have been studied; however, an important factor for their industrial use is the effect of EOS on sensory attributes. So currently, research is mainly focused on methods that allow the incorporation of EOS in foods, seeking consumer acceptance. Therefore, the objective of this work is to compile current literature reporting several methods of application of EOS, describing their fundamentals, advantages and disadvantages, and especially their effect on sensory attributes. Moreover, new uses of EOS in industries related to the food production chain are considered.

Keywords: essential oils, application methods, natural preservatives, sensory attributes.

INTRODUCCIÓN

La vida útil, las propiedades nutricionales, los atributos sensoriales y la calidad microbiana de los productos alimenticios son aspectos importantes para los consumidores. Debido a esto, las industrias alimentarias buscan hacer uso de sustancias o compuestos que aseguren la inocuidad de sus productos sin comprometer su calidad (Cueva *et al.*, 2011).

Durante la elaboración de alimentos se utilizan distintos conservadores para asegurar la inocuidad y calidad de estos (Prakash y Kiran, 2016). No obstante, la mayoría de los conservadores utilizados son sintéticos y algunos han sido asociados con problemas a la salud a largo plazo, como fallas renales, hipertiroidismo, cirrosis hepática, cáncer, entre otros (Scotter y Castle, 2004; Faleiro, 2011; Manning, 2015; Silano y Silano, 2015; Singh y Ghandi, 2015; Szűcs *et al.*, 2019). Como resultado, existe una demanda creciente de productos naturales que puedan servir como conservadores (Cueva *et al.*, 2011).

Los aceites esenciales (AE) son metabolitos secundarios obtenidos de diferentes plantas, que han sido ampliamente utilizados como conservadores naturales debido a que son, en muchos casos, más seguros que los sintéticos tanto para los seres humanos como el medioambiente (Burt, 2004). Asimismo, se ha demostrado que tienen propiedades biológicas, entre las que destacan las antibacterianas, antiparasitarias, antifúngicas, antioxidantes, desinfectantes e insecticidas (Solórzano-Santos y Miranda-Novales, 2012).

Debido a sus propiedades, los AE han sido utilizados en la industria agroalimentaria. Se han aplicado directamente en los sistemas alimentarios, ya sea en forma de polvo o líquido, por medio de películas o recubrimientos comestibles, en fase vapor, como nanoemulsiones y liposomas (Gyawali e Ibrahim, 2014). Sin embargo, su aplicación en la industria es limitada debido a su impacto en el sabor y olor, especialmente a concentraciones en las que muchos AE presentan un efecto antimicrobiano. Por lo que, la concentración más aceptable en términos tanto de seguridad como de calidad alimentaria estará en función de tipo

de AE, así como de sus compuestos activos, el tipo de alimento al que se incorpora, el método de aplicación y los métodos de producción de alimentos (Goñi *et al.*, 2009).

Por todo lo anterior, el objetivo de este trabajo es la recopilación de literatura actual donde se mencionen diversos métodos de aplicación de los AE, describiendo sus fundamentos, alcances y limitaciones, especialmente su efecto en los atributos sensoriales. Además, se abordarán nuevos usos de los AE en industrias relacionadas con la cadena de producción de alimentos.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. Métodos de aplicación de aceites esenciales en alimentos y sus efectos en atributos sensoriales

1.1. Contacto directo

Este método de aplicación consiste en agregar el AE, ya sea en forma de polvo o líquido, directamente en los sistemas alimentarios. Sin embargo, su aplicación es limitada, debido al fuerte olor y sabor que los AE imparten a los productos alimenticios, especialmente a concentraciones en las que son considerados agentes antimicrobianos. Por lo que muy pocos AE cumplen con las características químicas (composición cualitativa y cuantitativa, concentración requerida), físicas (solubilidad, volatilidad) y sensoriales (fuertes sabores o aromas) requeridas para ser aplicados por contacto directo (Ribeiro-Santos *et al.*, 2017).

Estudios *in vitro* e *in vivo*, han reportado que el efecto antimicrobiano de los AE se debe a la presencia de diferentes compuestos activos que actúan de manera sinérgica (Cava *et al.*, 2007; Budka y Khan, 2010; Jahani *et al.*, 2020). No obstante, Fisher y Phillips (2006) mencionaron que las concentraciones obtenidas en condiciones *in vitro* no siempre son eficaces cuando se aplican en un alimento, por lo que la concentración de AE necesaria para observar el mismo efecto podría aumentar y afectar los niveles sensoriales aceptables (Ribeiro-Santos *et al.*, 2017).

1.1.1. Aplicación de aceites esenciales en contacto directo y su efecto en diversos atributos sensoriales

La aplicación de AE por contacto directo se ha probado en diferentes alimentos, como productos cárnicos (hamburguesas de carne, carne molida, salchichas, pescado, entre otros) y frutas (piña, mango, guayaba y manzana). En general, los AE de canela (*Cinnamomum verum*), hierbabuena (*Mentha spicata*), toronjil (*Melissa officinalis*), ajedrea (*Satureja montana*) y enebro (*Juniperus communis*) han presentado buenos resultados contra bacterias patógenas como *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella Thypimurium* y *Escherichia coli* (De Sousa Guedes *et al.*, 2016; Ghabraie *et al.*, 2016; Sharma *et al.* 2017; Abdeldaiem *et al.*, 2017; Nikkhah y Hashemi, 2020). Por su parte, los AE de romero (*Salvia rosmarinus*) y canela reducen y previenen el crecimiento de bacterias Gram positivas como *Staphylococcus aureus* y *Listeria monocytogenes* (Ghabraie *et al.*, 2016; Abdeldaiem *et al.*, 2017), las cuales son más sensibles a la presencia de AE (Bhavaniramya *et al.*, 2019).

El efecto sobre los atributos sensoriales de AE aplicados por contacto directo en sistemas alimentarios se muestra en la tabla I. Algunos autores reportan su aplicación en la conservación del pescado, Abdeldaiem *et al.* (2017) adicionaron 4 tipos de AE: hinojo (*Foeniculum vulgare*), cardamomo (*Elettaria cardamomum*), canela o romero en dedos de pescado y evaluaron su aceptabilidad (apariencia, olor y textura) durante el almacenamiento a -4 °C; observándose que, además de alargar la vida útil del producto a un total de 12 días durante el almacenamiento (la de la muestra de control sin AE fue de 4 días), también mejoraron sus características sensoriales. El AE de romero presentó los mejores resultados, ya que fue aceptado en los tres atributos mencionados. Por otro lado, Emir Çoban *et al.* (2014) evaluaron los AE de romero, tomillo (*Thymus vulgaris*), salvia (*Salvia officinalis*) y clavo (*Syzygium aromaticum*), en filetes de trucha ahumada almacenados a 4 °C. A diferencia de los resultados anteriores, los filetes de pescado con AE de romero tuvieron una aceptabilidad sensorial más baja en comparación con los otros AE utilizados (tomillo, salvia y clavo), lo cual podría

deberse a que los filetes de trucha se evaluaron ahumados y no crudos, como los dedos de pescado, afectando la afinidad de los AE con el producto alimenticio. Burt (2004) menciona que el efecto sensorial negativo puede ser minimizado mediante una correcta selección del AE según el tipo de alimento, por ejemplo, la canela tiene mejor afinidad con diversas frutas y sus productos (Pateiro *et al.*, 2018; Perricone *et al.*, 2015).

Un claro ejemplo de lo anterior se observó en *burfi* (un postre de la India) adicionado con AE de clavo y curri (*Murraya koenigii*) (Badola *et al.*, 2018) y en jugos de guayaba, piña, mango y manzana *cashew* con AE de hierbabuena y toronjil (De Sousa Guedes *et al.*, 2016). En ambos estudios se logró la inhibición de microorganismos; sin embargo, las propiedades sensoriales se vieron afectadas negativamente, ya que el sabor del AE disminuía la aceptabilidad sensorial (sabor, olor, resabio o aceptabilidad general).

Uno de los usos más comunes de los AE por contacto directo es en productos cárnicos. Se ha reportado que el AE de canela al 0.25 % y una combinación de canela china (*Cinnamomum cassia*) y corteza de canela al 0.05 % generan una buena aceptabilidad sensorial en carne lista para comer y salchichas de pollo, respectivamente (Ghabraie *et al.*, 2016; Sharma *et al.*, 2017). Al igual que la pimienta china en *sashimi*, donde los atributos sensoriales estudiados fueron aceptables (He *et al.*, 2019).

Por otro lado, el AE de ajedrea, el cual es poco común, se aplicó en salchichas de cerdo (Šojić *et al.*, 2019) y carne de res marinada con vino (Vasilijević *et al.*, 2019). En ambos trabajos se hace notar que el sabor del AE afectó negativamente los atributos sensoriales (olor y sabor). Sin embargo, el método de extracción del AE puede modificar su composición. Šojić *et al.* (2019) reportaron que el AE de ajedrea extraído mediante hidrodestilación poseía un olor picante, debido a que la concentración de terpenos volátiles fue más alta, a diferencia del AE extraído mediante fluido supercrítico, esta tecnología disminuyó la cantidad de compuestos volátiles (terpenos) y puede mejorar la aceptabilidad sensorial al reducir los olores/sabores picantes.

Tabla I. Efecto de algunos aceites esenciales aplicados por contacto directo sobre los atributos sensoriales de diversos alimentos

| Aceite | Concentración | Alimento | Atributo sensorial | Resultados principales | Referencias |
|--|--|--|--|---|------------------------------|
| Salvia (<i>Salvia officinalis</i>), romero (<i>Salvia rosmarinus</i>), tomillo (<i>Thymus vulgaris</i>) y clavo (<i>Syzygium aromaticum</i>) | 600 ppm | Trucha arcoíris ahumada | Apariencia, sabor y olor | El AE de clavo tuvo mayor aceptación en todos los atributos. | Emir Çoban et al., 2014 |
| Hisopo (<i>Hyssopus officinalis</i>) y cilantro (<i>Coriandrum sativum</i>) | 0.02 % | Carne de res molida | Olor y sabor | AE de cilantro tuvo mayor aceptación en ambos atributos. | Michalczyk et al., 2012 |
| Hierbabuena (<i>Mentha spicata</i>) y toronjil (<i>Melissa officinalis</i>) | 0.625 y 1.25 μ L/mL, respectivamente | Jugos de piña, mango, guayaba y nuez de la India | Apariencia, olor, viscosidad, sabor, resabio y aceptabilidad general | Ambos AE tuvieron efectos negativos en el sabor, el resabio y la aceptabilidad general. El AE de hierbabuena tuvo mayor aceptación en los otros atributos estudiados. | De Sousa Guedes et al., 2016 |
| Combinación de canela china (<i>Cinnamomum cassia</i>) y corteza de canela (<i>Cinnamomum verum</i>) | 0.05 % | Carne lista para comer y carne molida magra | Sabor y olor en ambos tipos de carne | El AE tuvo mayor aceptación en ambas carnes, en ambos atributos. | Ghabraie et al., 2016 |
| Hinojo (<i>Foeniculum vulgare</i>), cardamomo (<i>Elettaria cardamomum</i>), canela y romero | 10 mL/kg | Dedos de pescado | Apariencia, olor y textura | El AE de romero tuvo mayor aceptación en todos los atributos hasta los 12 días de almacenamiento. | Abdeldaiem et al., 2017 |
| Clavo, albahaca (<i>Ocimum basilicum</i>), tomillo y canela china | 0.25, 0.125, 0.25 y 0.125 % | Salchichas de pollo | Apariencia, sabor, jugosidad, textura y aceptabilidad general | El AE de canela china al 0.25 % tuvo mayor aceptación en todos los atributos. | Sharma et al., 2017 |
| Clavo y curri (<i>Murraya koenigii</i>) | 0.05, 0.15 y 0.25 % | Burfi | Sabor, cuerpo, textura, color, apariencia y aceptabilidad general | El sabor y aceptabilidad general se vieron afectados conforme se aumentó la concentración del AE. El AE de clavo al 0.15 % tuvo la mayor aceptación. | Badola et al., 2018 |
| Ajedrea (<i>Satureja montana</i>) | 0.075 y 0.150 μ L/g | Salchichas de cerdo | Sabor, olor y aceptabilidad general | El AE obtenido por extracción con fluido supercrítico a una concentración de 0.075 μ L/g tuvo mayor aceptación en todos los atributos. | Šojić et al., 2019 |

Tabla I. Efecto de algunos aceites esenciales aplicados por contacto directo sobre los atributos sensoriales de diversos alimentos (continuación)

| Aceite | Concentración | Alimento | Atributo sensorial | Resultados principales | Referencias |
|--|---|--------------------------------|---|--|----------------------------------|
| Enebro (<i>Juniperus communis</i>) y ajedrea | 0.0625, 0.125, 0.25 y 0.5 % | Carne de res marinada con vino | Sabor marinado y defectos de olor | El AE de enebro al 0.25 % tuvo mayor aceptación en ambos atributos. Como defectos de sabor y olor, se reporta un sabor picante, agudo y artificial con el AE de ajedrea. | Vasilijević <i>et al.</i> , 2019 |
| Pimienta china (<i>Zanthoxylum piperitum</i>) | 0.3 % | Sashimi | Color, olor, textura y aceptabilidad general | Tuvo buena aceptabilidad en todos los atributos hasta los 15 días de almacenamiento. | He <i>et al.</i> , 2019 |
| Combinación de tomillo, romero y canela | 0.078, 0.625 y 0.156 g/L, respectivamente | Jujube | Textura, sabor, aroma y aceptabilidad general | La combinación de AE no generó efectos negativos en los atributos evaluados. | Nikkhah y Hashemi, 2020 |

AE = aceite esencial/aceites esenciales.

1.2. Fase vapor

Este método de aplicación consiste en evaluar el vapor generado por los AE sobre distintos sistemas alimentarios. Se ha reportado que tiene un mayor efecto antimicrobiano en comparación con los AE en forma líquida aplicados por contacto directo, debido a que se requiere más volumen de AE líquido para lograr el mismo efecto biológico que en forma gaseosa (Reyes-Jurado *et al.*, 2019).

La volatilidad de los AE depende de factores como el peso molecular de sus componentes, ya que entre más pequeña sea la molécula, su difusividad es más alta (Saifullah *et al.*, 2019); adicionalmente, al elevar la temperatura del ambiente fomenta la migración de los compuestos volátiles (Ribeiro-Santos *et al.*, 2017). Debido a que no existe un método estándar y a la variación en la composición (determinada tanto cualitativa como cuantitativamente) de los AE, la comparación de los resultados de la actividad antimicrobiana en fase vapor es difícil. Uno de los métodos más prometedores para este propósito parece ser la

prueba de volatilización de disco (Mejía-Garibay *et al.*, 2015), el cual puede ser modificado para la conservación de alimentos generando «empaques activos», que permiten la volatilización y migración de los componentes activos del «disco en el empaque» al alimento (Ribeiro-Santos *et al.*, 2017).

1.2.1. Aplicación de aceites esenciales en fase vapor y su efecto en diversos atributos sensoriales

El efecto en distintos atributos sensoriales de una selección de AE aplicados en fase vapor en diferentes sistemas alimentarios se enlista en la tabla II. Se han utilizado AE contra diversos mohos patógenos (*Aspergillus*, *Alternaria*, *Penicillium* y *Botrytis*) en frutas como manzanas y uvas. En el caso específico de las uvas, se realizó un análisis sensorial a través de una prueba triangular para observar si el tiempo de exposición del AE afectaba los atributos sensoriales; los resultados indicaron que la exposición a AE de lavanda (*Lavandula*), romero (*Salvia rosmarinus*) y menta (*Mentha piperita*) podían ser percibidos

incluso 24 horas después del tratamiento, debido a la gran cantidad de compuestos aromáticos que contienen (Servili *et al.*, 2017). Por otro lado, Frankova *et al.* (2016) evaluaron la aceptabilidad sensorial de manzanas tratadas con AE de orégano (*Origanum vulgare*), canela (*Cinnamomum verum*) y clavo (*Syzygium aromaticum*) en fase vapor con una escala no estructurada; al aumentarse la concentración de los AE de orégano y canela presentaron aromas diferentes a la manzana. Aunque el AE de orégano mostró mejor actividad antifúngica (CMI: 2 μ L de AE/L_{aire}), afectó negativamente los atributos sensoriales

cuando se usaba a esta concentración. Esto puede deberse a que se ha reportado que el AE de orégano proporciona un sabor herbáceo, a diferencia del sabor dulce que imparte el AE de canela (Pateiro *et al.*, 2018; Perricone *et al.*, 2015). Este último también ha sido evaluado y aceptado en vegetales como champiñones (Jiang *et al.*, 2015). Por lo tanto, una solución para minimizar los cambios sensoriales es reducir el tiempo de exposición a los vapores de los aceites o prolongar el tiempo entre el tratamiento y el consumo del producto tratado (Servili *et al.*, 2017).

Tabla II. Efecto de algunos aceites esenciales aplicados por fase vapor sobre los atributos sensoriales de diversos alimentos

| Aceite | Concentración | Alimento | Atributo sensorial | Resultados principales | Referencias |
|---|-------------------|--------------------------------|---|--|-----------------------------------|
| Canela (<i>Cinnamomum verum</i>), tomillo (<i>Thymus vulgaris</i>) y clavo (<i>Syzygium aromaticum</i>) | 5 μ L/L | Champiñones | Olor y apariencia | El AE de canela tuvo mayor aceptación en ambos atributos durante 20 días de almacenamiento. | Jiang <i>et al.</i> , 2015 |
| Orégano (<i>Origanum vulgare</i>), canela y clavo | 4 y 16 mL/L | Manzanas | Sabor y olor | El AE de canela tuvo mayor aceptación en ambos atributos hasta los 14 días de almacenamiento. | Frankova <i>et al.</i> , 2016 |
| Lavanda (<i>Lavandula</i>), romero (<i>Salvia rosmarinus</i>) y menta (<i>Mentha piperita</i>) | 5 mL | Uvas | Sabor | Los jueces percibieron la diferencia entre el control sin AE y con AE hasta las 24 horas. El AE más percibido fue el de lavanda. | Servili <i>et al.</i> , 2017 |
| Pimienta gorda (<i>Pimenta dioica</i>), romero y tomillo | 0.8-11.7 mL/Laire | Semillas de alfalfa germinadas | Grado de diferencia en general entre las semillas germinadas con y sin AE | Hubo una diferencia moderada en las semillas con AE de pimienta gorda y tomillo, y diferencia ligera con el AE de tomillo. Además, los germinados de las semillas tratadas con AE de pimienta gorda tuvieron mayor aceptación sensorial. | Lorenzo-Leal <i>et al.</i> , 2019 |
| Tomillo, comino, clavo y orégano | 125-500 μ L | Rebanadas de pan | Aceptabilidad general de olor y sabor | Hubo buena aceptabilidad con AE de tomillo y comino hasta los 4 días de almacenamiento. | Císcarová <i>et al.</i> (2020) |

De igual forma, Mani López *et al.* (2018) y Císcarová *et al.* (2020) evaluaron la exposición de diferentes AE en pan para la inhibición de mohos de los géneros *Penicillium* [AE de zacate limón (*Cymbopogon citratus*)] y *Aspergillus* [AE de tomillo (*Thymus vulgaris*), clavo, comino (*Cuminum cyminum*) y orégano], respectivamente. En ambos trabajos reportan que los atributos sensoriales de olor, sabor y aceptabilidad general fueron aceptables incluso después de 21 días de almacenamiento con el AE de zacate limón y 14 días con los AE de tomillo y comino.

Por otra parte, Lorenzo-Leal, Palou y López-Malo (2019) evaluaron la actividad antimicrobiana en fase de vapor de AE de pimienta gorda (*Pimenta dioica*), tomillo y romero, contra *Listeria monocytogenes* y *Salmonella Typhimurium* en semillas de alfalfa. Además, realizaron un análisis sensorial a través de una prueba triangular con la que encontraron que la diferencia entre las muestras fue moderada entre AE de pimienta gorda y tomillo, y ligeramente para las semillas germinadas tratadas con AE de romero. Estos autores destacan que la mayoría de los panelistas prefirieron los brotes de las semillas tratadas con AE de pimienta gorda y de romero a las muestras de control que no contenían AE. Esto comprueba que algunos AE en fase vapor a una concentración adecuada pueden tener un impacto positivo en los atributos sensoriales de diversos productos alimenticios.

1.3. Nanoemulsiones

Otra alternativa para la aplicación de AE es la encapsulación; esta se define como una tecnología que permite atrapar componentes sensibles en una matriz homogénea o heterogénea, lo cual le brinda protección e incrementa su estabilidad a condiciones adversas, además, ayuda a controlar su liberación (García-Ceja y López-Malo, 2012). Existen diferentes métodos de encapsulación, entre ellos se encuentra la coacervación simple o compleja, el secado por aspersión, el recubrimiento por lecho fluidizado, y las emulsiones/nanoemulsiones (Velázquez-Contreras *et al.*, 2014).

Las emulsiones han demostrado ser buenas portadoras para la entrega de sustancias lipídicas como lo son los AE. Las emulsiones se componen de dos fases, la oleosa (o) y la acuosa (w). La emulsión aceite en agua (o/w) consiste en pequeñas gotas de aceite como fase dispersa contenidas en el agua como fase continua; y en la emulsión de agua en aceite (w/o) las gotas de

la fase dispersa son de agua y la fase continua es aceite. En la industria de alimentos, las emulsiones más comunes son del tipo o/w, así como las micro- o nano-emulsiones.

La característica primordial de las nanoemulsiones es su tamaño de gota (entre 20 y 1000 nm) y se puede preparar utilizando diferentes métodos, como la homogenización a alta presión, la microfluidización, la homogenización mecánica a alta velocidad, ultrasonidos, emulsión espontánea y la inversión de fase, entre otros (Jin *et al.*, 2016; Walker *et al.*, 2015). Su importancia radica en que el tamaño de partícula nanométrica permite aumentar la biodisponibilidad, bioeficiencia y estabilidad (McClements, 2011).

1.3.1. Aplicación de aceites esenciales por nanoemulsiones en alimentos y su efecto en diversos atributos sensoriales

El uso e incorporación de las nanoemulsiones de AE en alimentos es una técnica que ha ganado relevancia, debido a que el incremento de la superficie de contacto mejora la actividad antimicrobiana, ya que los componentes activos están más disponibles (Otoni *et al.*, 2014). Aunque las nanoemulsiones han tenido mayor aplicación en alimentos que otros métodos, el enfoque sensorial aún es escaso, puesto que pocos reportes han estudiado el efecto de las nanoemulsiones en las propiedades sensoriales de los alimentos.

La aplicación de nanoemulsiones en alimentos se ha probado principalmente en la conservación de pescados (tabla III). Ozogul *et al.* (2017) evaluaron el efecto antimicrobiano de nanoemulsiones con AE de romero (*Salvia rosmarinus*), laurel (*Laurus nobilis*), tomillo (*Thymus vulgaris*) y sábila (*Aloe vera*) sobre la calidad de trucha arcoíris. Los resultados del análisis microbiológico indicaron que los AE redujeron hasta 3 Log UFC/g el recuento de bacterias anaerobias mesofílicas, bacterias psicrótrofas (principales microorganismos responsables del deterioro de pescado fresco) y enterobacterias; además incrementó 3 días más la vida útil del pescado tratado con los AE, llegando a un total de 17 días (la de la muestra de control sin AE fue de 14 días). Del mismo modo, Alfonzo *et al.* (2017) evaluaron el efecto antimicrobiano del AE de limón (*Citrus × limon*) contra las mismas bacterias, teniendo como resultado la reducción de solo 2 Log UFC/g. En cuanto a la evaluación sensorial, ambos estudios

utilizaron una escala hedónica de 9 y 10 puntos, respectivamente, para la evaluación del sabor, olor y textura en los pescados. Los AE probados en ambos pescados tuvieron una buena aceptabilidad en todos los atributos, con excepción del AE de romero, el cual obtuvo la calificación más baja debido a que le daba un sabor amargo a la trucha.

Del mismo modo, se han evaluado nanoemulsiones con AE de orégano (*Origanum vulgare*), tomillo y anís estrellado (*Illicium verum*) en carpa china (Huang *et al.*, 2018), así como orégano, tomillo y ajo en salmón y bacalao (Pedrós-Garrido *et al.*,

2020). En ambos estudios se determinó que el AE de orégano, además de presentar la mejor actividad antimicrobiana contra *Pseudomonas* (reducción de $1 \log_{10}$ UFC/g) y *Listeria* (CMI 0.02 %), también mostraba la mejor aceptabilidad sensorial en cuanto a olor, color y textura y podía alargar la vida útil en carpa china por 2 días, logrando un total de 4 días (la de la muestra de control sin AE fue de 2 días). Sin embargo, los AE probados en bacalao enmascaraban el sabor característico de este pescado, por lo que no todos los AE tienen un efecto positivo en las propiedades sensoriales de los pescados.

Tabla III. Efecto de algunos aceites esenciales aplicados por nanoemulsiones sobre los atributos sensoriales de diversos alimentos

| Aceite | Concentración | Alimento | Atributo sensorial | Resultados principales | Referencias |
|---|-------------------------------------|------------------|---|---|-------------------------------------|
| Limón (<i>Citrus × limon</i>) | 0.3 y 1 % | Sardinas saladas | Olor, textura y sabor | Hubo buena aceptación en todos los atributos con ambas concentraciones de AE. | Alfonzo <i>et al.</i> , 2017 |
| Romero (<i>Salvia rosmarinus</i>), laurel, tomillo (<i>Thymus vulgaris</i>) y sábila (<i>Aloe vera</i>) | 4 % | Trucha arcoíris | Sabor, olor, color y aceptabilidad general | Los AE de tomillo y laurel tuvieron mayor aceptación en todos los atributos. | Ozogul <i>et al.</i> , 2017 |
| Orégano (<i>Origanum vulgare</i>), tomillo y anís estrellado | 0.1 % | Carpa china | Color, olor, textura y aceptabilidad general | El AE de orégano tuvo mayor aceptación en todos los atributos hasta los 10 días de almacenamiento. | Huang <i>et al.</i> , 2018 |
| Canela (<i>Cinnamomum verum</i>), romero y orégano | 10 % | Apio | Olor, color, textura, apariencia, sabor y aceptabilidad general | El AE de canela tuvo mayor aceptación en todos los atributos. | Dávila <i>et al.</i> , 2019 |
| Orégano y romero | 40 y 80 μ L/mL, respectivamente | Queso fresco | Olor, apariencia, sabor y textura | Ambos AE tuvieron un efecto positivo en aroma y sabor hasta los 21 días de almacenamiento. | Diniz-Silva <i>et al.</i> , 2019 |
| Zacate limón (<i>Cymbopogon citratus</i>), ajo (<i>Allium sativum</i>), orégano y tomillo | 0.2, 0.4 y 0.8 % | Salmón y bacalao | Generar los atributos sensoriales para cada uno | El AE de orégano al 0.2 % tuvo la mayor aceptación para el salmón. Mientras que todos los AE probados enmascararon el sabor propio del bacalao. | Pedrós-Garrido <i>et al.</i> , 2020 |

Por su parte, Dávila-Rodríguez, López-Malo, Palou, Ramírez-Corona y Jiménez-Munguía (2019) evaluaron la actividad antimicrobiana contra *E. coli* y *Listeria monocytogenes* de los AE de canela (*Cinnamomum verum*), romero y orégano encapsulados por nanoemulsiones (o/w), comparando con los mismos aceites no encapsulados. Estos últimos fueron menos eficaces que las nanoemulsiones. Para inhibir la misma carga microbiana (5 Log UFC/g) se requirió 50 % menos AE cuando se aplicó en nanoemulsión. Al mismo tiempo, realizaron el análisis sensorial utilizando una escala hedónica de 9 puntos, evaluando los atributos de olor, color, textura, apariencia, sabor y aceptabilidad general, aplicando las nanoemulsiones de los AE en apio fresco. Como resultado encontraron que el apio con las nanoemulsiones del AE de canela fue el mejor aceptado, ya que enmascaraba el sabor típico del apio, el cual no suele ser tan aceptado por algunos consumidores. Al igual que Ozogul *et al.* (2017), encontraron que el AE de romero era el menos aceptado debido al aroma herbáceo y sabor amargo que imparte, por lo que este AE no es aceptado en varios tipos de alimentos.

1.4. Películas comestibles

El uso de materiales biodegradables puede ser un medio importante para la incorporación de AE. Debido a esto y con la finalidad de reducir el consumo de empaques plásticos, se han generado empaques biodegradables, así como películas y recubrimientos comestibles para el almacenamiento de alimentos frescos o procesados.

Una película comestible (PC) es una capa preformada de materiales comestibles, elaborada a base de biopolímeros como carbohidratos, proteínas y lípidos (Sánchez Aldana *et al.*, 2014), que puede aplicarse sobre los alimentos para prolongar su vida útil. Estudios previos han demostrado que las películas elaboradas a partir de carbohidratos son ampliamente utilizadas debido a que presentan buenas propiedades mecánicas y actúan como barrera contra compuestos de baja polaridad; sin embargo, pueden presentar alta permeabilidad contra la humedad (Parra *et al.*, 2004). Por otro lado, las películas comestibles elaboradas a base de proteína, como la gelatina, son excelentes barreras al oxígeno, dióxido de carbono y algunos compuestos aromáticos; no obstante, sus propiedades mecánicas no son tan eficientes (Jang *et al.*, 2011).

Además de la matriz polimérica principal, es necesaria la incorporación de algunos aditivos como agentes plastificantes. Los cuales son sustancias no volátiles de bajo peso molecular que, al adicionarse a un material polimérico, modifican las propiedades físicas y mecánicas, por ejemplo, su flexibilidad, manejabilidad y habilidad de extensión (Osés *et al.*, 2009).

1.4.1. Aplicación de aceites esenciales por películas en alimentos y su efecto en diversos atributos sensoriales

La aplicación de empaques comestibles como coadyuvantes en la conservación (almacenamiento, calidad y seguridad) de alimentos, es una de las soluciones más eficaces para asegurar la inocuidad de estos (Gómez-Estaca *et al.*, 2014).

Las películas comestibles pueden aplicarse como envoltura, método de embalaje, o separación entre capas (Ribeiro-Santos *et al.*, 2017). No obstante, cuando la película recubre directamente al producto, al ser ingerida puede modificar las características sensoriales del producto. Por otro lado, la migración de los compuestos presentes en la película puede ocurrir, similar al fenómeno de transferencia de masa en la fase vapor, dando el mismo resultado en la alteración del aroma y sabor. A pesar de esto, muy pocos estudios han realizado el análisis sensorial para evaluar la aceptabilidad de los diferentes alimentos que han utilizado películas comestibles a base de AE como método de conservación.

En la tabla IV se presentan diversos estudios donde se han aplicado películas comestibles con AE y su efecto en las características sensoriales de diversos productos cárnicos y pescados. En general, los AE modificaron los atributos sensoriales estudiados. Se han evaluado PC de alginato de sodio con AE de orégano (*Origanum vulgare*) y romero (*Salvia rosmarinus*) en filetes de carne de res (Vital, Guerrero, Kempinski *et al.*, 2018), y con AE de jengibre (*Zingiber officinale*) y orégano en filetes de tilapia (Vital, Guerrero, Ornaghi *et al.*, 2018). Los resultados indicaron que las PC con AE de orégano afectaban negativamente las propiedades sensoriales (olor, sabor y aceptabilidad general) en ambos productos y los evaluadores preferían los filetes de res y tilapia con AE de romero y jengibre, respectivamente. No obstante, se ha reportado que el AE de orégano aplicado en PC de quitosano en pargo rojo, mantiene buenos atributos sensoriales (olor y sabor) incluso después de 20 días de almacenamiento (Vatavali *et al.*, 2013).

Un AE menos común es el de zataria (*Zataria multiflora*), cuyo componente principal es el timol (sabor a especias y madera), el cual fue incorporado a una PC de almidón y confirió buenas propiedades sensoriales a empanadas de carne molida (Amiri *et al.*, 2019). Este mismo compuesto se encuentra presente en el AE de tomillo (*Thymus vulgaris*), el cual ha sido evaluado por Agrimonti

et al. (2019) en las afectaciones al color, olor y sabor de carne molida; Yemiş y Candoğan (2017), por su parte, analizaron la apariencia, color, olor, sabor y aceptabilidad general en carne de res; mientras que Soncu *et al.* (2018) estudiaron el olor, color, sabor y aceptabilidad general en salchichas. Todos estos autores destacan que el uso del AE de tomillo generó buenos atributos sensoriales.

Tabla IV. Efecto de algunos aceites esenciales aplicados por películas comestibles (PC) sobre los atributos sensoriales de diversos alimentos

| PC | Aceite | Concentración | Alimento | Atributo sensorial | Resultados principales | Referencias |
|-------------------|---|---------------|-------------------------|--|---|---|
| Quitosano | Orégano (<i>Origanum vulgare</i>) | 0.1 | Pargo rojo | Olor y sabor | Hubo buena aceptabilidad para ambos atributos durante 20 días de almacenamiento. | Vatavali <i>et al.</i> , 2013 |
| Quitosano | Anís (<i>Pimpinella anisum</i>) | 1.5 y 2 | Hamburguesas de pollo | Olor y sabor | Hubo buena aceptabilidad en todos los atributos durante 12 días de almacenamiento. | Mahdavi <i>et al.</i> , 2017 |
| Soya | Tomillo (<i>Thymus vulgaris</i>) y orégano | 1, 2 y 3 | Carne de res | Apariencia, color, olor, sabor, textura y aceptabilidad general de la carne cocida | No hubo diferencia significativa en apariencia, color, olor y textura. El AE de tomillo al 1% tuvo mayor aceptación en sabor y aceptabilidad general. | Yemiş y Candoğan, 2017 |
| Goma farsi | Clavo (<i>Syzygium aromaticum</i>) y tomillo | 1 y 2 | Trucha arcoíris | Textura, color, olor y aceptabilidad general | La combinación de los AE al 2% mostró mejores resultados en todos los atributos hasta el día 12 de almacenamiento. | Dehghani <i>et al.</i> , 2018 |
| Quitosano | Romero (<i>Salvia rosmarinus</i>) y tomillo | 0.2-0.1 | Sucuk | Olor, color, sabor y aceptabilidad general de las salchichas crudas y cocidas | El AE de tomillo al 1% tuvo mayor aceptación en todos los atributos en ambas salchichas. | Soncu <i>et al.</i> , 2018 |
| Alginato de sodio | Orégano y romero | 0.1 | Filetes de carne de res | Sabor, olor y aceptabilidad general | La PC con AE de romero tuvo mayor aceptación en todos los atributos. | Vital, Guerrero, Kempinski <i>et al.</i> , 2018 |
| Alginato de sodio | Jengibre (<i>Zingiber officinale</i>) y orégano | 0.1 | Filetes de tilapia | Olor, sabor, textura y aceptabilidad general | El olor fue el único atributo que mostró diferencias; el AE de jengibre tuvo mayor aceptación. | Vital, Guerrero, Ornaghi <i>et al.</i> , 2018 |

Tabla IV. Efecto de algunos aceites esenciales aplicados por películas comestibles (PC) sobre los atributos sensoriales de diversos alimentos (continuación)

| PC | Aceite | Concentración | Alimento | Atributo sensorial | Resultados principales | Referencias |
|----------|---|---------------|---------------------------|---|---|------------------------|
| Celulosa | Orégano, tomillo y canela (<i>Cinnamomum verum</i>) | 1 | Carne de res picada | Color, olor y sabor en la carne cocida | Los AE de orégano y tomillo tuvieron mayor aceptación en todos los atributos, en relación con el AE de canela, hasta los 15 días de almacenamiento. | Agrimonti et al., 2019 |
| Almidón | Zataria (<i>Zataria multiflora</i>) | 6 | Empanadas de carne molida | Sabor, color y olor de la carne cocida. | Hubo buena aceptación en todos los atributos evaluados. | Amiri et al., 2019 |

AE = aceite esencial/aceites esenciales.

1.5. Liposomas

Los liposomas son otro método de encapsulación y se definen como vesículas con una estructura esférica, constituidas por una bicapa fosfolípida (o dos o más de esas bicapas, separadas por regiones líquidas) que encierran material acuoso o soluble en lípidos. Los liposomas, cuyo tamaño puede variar desde unos pocos nanómetros hasta 1 μm de diámetro, suelen emplearse como sistemas de suministro de una amplia variedad de compuestos bioactivos como los AE (Khorasani et al., 2018).

El proceso convencional de fabricación de liposomas se basa en el uso de solventes orgánicos para disolver las unidades de construcción de los liposomas, la eliminación del disolvente para formar la bicapa lipídica y la subsiguiente dispersión de alta energía de la bicapa en agua para formar los liposomas. Sin embargo, su baja capacidad de carga, el alto costo de los materiales y la necesidad de procedimientos de preparación complejos, limitan su aplicación en producciones a gran escala (Fathi et al., 2019).

1.5.1. Aplicación de aceites esenciales por liposomas en alimentos y su efecto en diversos atributos sensoriales

Para superar la volatilidad e inestabilidad de los AE, se han estudiado las ventajas de los liposomas para encapsular los AE y

protegerlos contra entornos externos que podrían acelerar su volatilidad (Lin et al., 2018). Shidhaye et al. (2008) informaron que los liposomas podrían mejorar la estabilidad química y la biodisponibilidad de los antimicrobianos hidrofóbicos como los AE y sus compuestos bioactivos. Se ha estudiado el efecto antimicrobiano de los liposomas con distintos AE, tales como curri, eucalipto, canela, romero y nuez moscada (Valencia-Sullca et al., 2016; Cui et al., 2017; Tang y Ge, 2017; Maccioni et al., 2019; Zhu, Li, Cui y Lin, 2020); sin embargo, la aplicación y el estudio en alimentos aún es escaso.

En general, los pocos estudios de liposomas con AE aplicados en alimentos se han evaluado en distintos tipos de carne. Lin et al. (2019) evaluaron el efecto antimicrobiano del AE de crisantemo (*Chrysanthemum*) en diferentes concentraciones en liposomas (de triple capa) de quitosano y pectina, contra *Campylobacter jejuni* en pollo fresco. Se demostró que los liposomas presentan una alta actividad antimicrobiana contra *C. jejuni* en el pollo, logrando reducir 3.2 Log UFC/mL. Además, realizaron un análisis sensorial a través de una escala hedónica de 7 puntos, en donde evaluaron diferentes atributos como el color, olor, sabor y aceptación general del pollo. Los resultados indicaron que los liposomas de triple capa con el AE de crisantemo no solo podían minimizar el deterioro del pollo, sino también mantener su calidad sensorial.

Por otra parte, Wu *et al.* (2019) realizaron liposomas para encapsular AE de laurel (*Laurus nobilis*) (50 µL) y nanopartículas de plata, mezclados con quitosano con el fin de recubrir películas de polietileno para empacar carne de cerdo. Se demostró una buena actividad antimicrobiana contra *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus*, manteniendo la calidad de la carne de cerdo a 4 °C durante 15 d. De forma paralela, se realizó el análisis sensorial a través del método descriptivo; los parámetros del análisis sensorial de la carne incluyeron color, viscosidad, elasticidad y sabor, evaluados y calificados con una escala de 1 a 10. La evaluación sensorial mostró que los liposomas tienen un efecto positivo en la conservación de la calidad de la carne de cerdo (color, sabor, viscosidad y elasticidad) y podrían utilizarse para prolongar la vida útil de la carne de cerdo fresca almacenada a 4 °C.

2. Ventajas y desventajas de los métodos de aplicación de AE en alimentos

En la tabla V se enlistan las ventajas y desventajas de los métodos de aplicación de AE mencionados en esta revisión. Dentro de estas se destaca que el uso de nanoemulsiones o aplicados en fase vapor requieren una menor cantidad de AE para lograr los mismos efectos que los generados por contacto directo (Tongnuanchan y Benjakul, 2014), debido primordialmente a que se incrementa el área de exposición (Císcarová *et al.*, 2016; Artiga-Artigas *et al.*, 2018). Sin embargo, un aspecto negativo es que no hay métodos estandarizados para la aplicación de AE en fase vapor y la inestabilidad de las nanoemulsiones puede generar separación de las fases y no lograr una correcta incorporación del AE en el alimento (Císcarová *et al.*, 2016; Artiga-Artigas *et al.*, 2018).

En el caso de las películas comestibles, se requieren métodos de dispersión previos para su preparación; sin embargo, son efectivas y reemplazan el uso de materiales como el plástico (Umaraw *et al.*, 2020), el cual es muy utilizado en el área alimentaria. Por otra parte, el uso de liposomas parece ser un método

prometedor; sin embargo, su aplicación en alimentos todavía es escasa. Esto representa una oportunidad de investigación para su posible empleo en la conservación de alimentos.

Debido a las diferencias inherentes en los métodos de aplicación, no puede realizarse una adecuada comparación entre ellos, ya que tanto las concentraciones de los AE como su liberación controlada o la migración de algunos de sus compuestos, pueden alterar las propiedades sensoriales de los alimentos tratados. Con base en los diferentes estudios, el método de aplicación influirá en las características sensoriales de los productos alimenticios, por lo que la selección del método dependerá del AE y de la matriz alimenticia. En general, se busca que el uso de AE en alimentos proporcione atributos sensoriales favorables. Es importante enfatizar que, de acuerdo con los compuestos activos de cada AE, estos brindarán características sensoriales diferentes en cada grupo alimenticio, por lo que es fundamental conocer qué compuestos son responsables del aroma y/o sabor.

3. Nuevas tendencias de aceites esenciales en la industria agroalimentaria

3.1. Sanitización de superficies

La inocuidad de los productos alimenticios es una preocupación fundamental tanto para los consumidores como para la industria alimentaria. La presencia de microorganismos patógenos puede reducirse al aumentar las medidas de higiene a lo largo de toda la cadena alimentaria, implementando prácticas seguras durante la preparación y almacenamiento de alimentos. Sin embargo, no siempre es suficiente; en ocasiones las superficies contaminadas por bacterias, como *Salmonella* y *Escherichia coli*, pueden comprometer la seguridad alimentaria (Chia *et al.*, 2009; Duffy *et al.*, 2009).

Para reducir la propagación de bacterias a través de superficies contaminadas, se utilizan rutinariamente productos químicos para sanitizar y desinfectar las superficies que están en contacto con alimentos (Phillips, 2016). Sin embargo,

Tabla V. Ventajas y desventajas de diversos métodos de aplicación de aceites esenciales en alimentos

| Alimento | Atributo sensorial | Resultados principales | Referencias |
|-----------------------|--|---|--|
| Contacto directo | La aplicación es fácil y rápida. La actividad antimicrobiana contra distintos microorganismos patógenos es buena. | Se requiere de mayor cantidad de AE, lo que afecta las propiedades sensoriales de los alimentos. Proporcionan un olor y sabor fuerte a los alimentos. Tienen una alta hidrofobicidad y volatilidad. | Tongnuanchan y Benjakul, 2014 |
| Fase vapor | Se requiere menor cantidad de AE para lograr la inactivación microbiana. Pueden no afectar las propiedades sensoriales. | Es necesario crear empaques o sistemas modelo para su aplicación. El componente activo de los aceites puede migrar por difusión a la superficie del alimento, afectando sus características sensoriales. La composición del alimento puede interactuar con los AE, reteniendo algunos compuestos. | Cisarová <i>et al.</i> , 2016; Ribeiro-Santos <i>et al.</i> , 2017 |
| Nanoemulsiones | Presentan una mayor relación superficie activa/volumen debido a su tamaño de gota, lo que mejora el transporte de compuestos activos a través de membranas biológicas. Hay una reducción de la concentración de AE para la inactivación microbiana. Mejora la aceptación sensorial debido a la baja concentración de AE. | Se requiere el uso de surfactantes y estabilizantes. Su estabilidad no ha sido probada en algunos sistemas alimenticios. | Artiga-Artigas <i>et al.</i> , 2018 |
| Películas comestibles | Son biodegradables, previenen la pérdida de humedad, el desvanecimiento del color, la oxidación de lípidos y la formación de olores desagradables. Pueden mejorar la vida útil de algunos alimentos. | El costo de inversión para nuevos equipos de producción es alto. En muchos casos hacen falta materiales con las funcionalidades deseadas y hay una falta de regulaciones. Su aplicación se dificulta en algunos tipos de alimentos. | Umaraw <i>et al.</i> , 2020 |
| Liposomas | Tienen buena dispersabilidad en agua, buena biocompatibilidad, baja difusión, liberación lenta y actividad residual prolongada. | Su efectividad durante el almacenamiento es poca y no alarga la vida útil. Su aplicación en alimentos es escasa. | Chen <i>et al.</i> , 2019 |

AE = aceite esencial/aceites esenciales.

la presencia de productos como cloro, peróxido y peroxiácido, pueden generar subproductos, por ejemplo, trihalometanos, ácidos haloacéticos y otros compuestos potencialmente cancerígenos; por otro lado, algunos sanitizantes pueden contribuir al desarrollo de resistencia en las bacterias (Coroneo *et al.*, 2017; Halden, 2014; Xue *et al.*, 2017).

Los AE han demostrado ser una alternativa al uso de agentes químicos sintéticos, puesto que son seguros para el consumo humano y amigables con el medioambiente (Sánchez y Aznar, 2015). Falcó, Verdeguer, Aznar, Sánchez y Randazzo (2018) evaluaron nueve AE para desarrollar una solución desinfectante natural para tratar superficies de contacto con alimentos. Entre los AE probados, el AE de tomillo andaluz (*Thymbra capitata*), que contiene hasta un 93.31 % de monoterpenos oxigenados (principalmente carvacrol), mostró la mayor actividad antimicrobiana. La solución desinfectante se evaluó en superficies de acero inoxidable, vidrio y polipropileno. Los resultados mostraron que concentraciones de 25 % del AE de *T. capitata* aplicadas durante 10 minutos reducen los niveles de *Escherichia coli* y *Salmonella enterica* en 3 y 1 Log UFC/g, respectivamente, en las tres superficies probadas.

Por otra parte, los AE se han probado solo en superficies de acero inoxidable como en los trabajos de Valeriano *et al.* 2012, donde evaluaron soluciones desinfectantes de AE de menta (*Menta piperita*) y zacate limón (*Cymbopogon citratus*) al 0.8 % contra la biopelícula de *Salmonella enterica*; los resultados demostraron que, después de 20 y 40 minutos de contacto, ambos AE inhibían por completo el crecimiento bacteriano. De igual manera, Pereira *et al.* (2019) encontraron una reducción de 5.8 Log UFC/g en la biopelícula producida por *Pseudomonas aeruginosa* al aplicar una solución desinfectante que contenía 0.4 % de AE de canela.

Estos estudios confirman que el uso de AE es una alternativa fácil para preparar soluciones desinfectantes que pueden reducir la colonización microbiana de las superficies de procesamiento de alimentos. Asimismo, los AE podrían proporcionar

métodos alternativos o complementarios para la desinfección eficiente de superficies industriales poco contaminadas. Sin embargo, es importante enfatizar que algunos parámetros, como el tiempo de contacto y la temperatura, requieren ajustes para la aplicación de agentes antimicrobianos a escala industrial. De acuerdo con De Oliveira, Brugnera, Nascimento, Batista y Piccoli (2012), no se produce un olor residual a concentraciones bajas de soluciones con AE; una ventaja más para su aplicación.

3.2. Insecticidas

Las plagas de insectos representan una pérdida económica considerable para la industria agroalimentaria. El uso excesivo de insecticidas sintéticos como organofosforados y piretroides para controlar las plagas ha provocado problemas graves como la resistencia de plagas y la contaminación de ambientes terrestres y acuáticos (Campos *et al.*, 2018; Pourya *et al.*, 2018). El desarrollo de estrategias ecológicas se ha considerado alrededor del mundo para reemplazar estos pesticidas convencionales.

En consecuencia, los bioinsecticidas basados en AE parecen ser un método adecuado para el control de plagas de insectos (Campolo *et al.*, 2017; Mossa, 2016; Yeom *et al.*, 2018). Los AE y sus componentes activos son selectivos, biodegradables y disminuyen los efectos negativos sobre los animales y el medio ambiente de los insecticidas sintéticos (Bedini *et al.*, 2018; Hashem *et al.*, 2018; Karan *et al.*, 2018).

Yeguerman *et al.* (2020) evaluaron los AE de menta (*Menta piperita*), palmarosa (*Cymbopogon martinii*), geranio (*Geranium*), lavanda (*Lavandula*) y romero (*Salvia rosmarinus*) contra la cucaracha alemana (*Blatella germanica L.*). Los AE de menta y palmarosa fueron los más eficaces, con una concentración letal de LC_{50} de 245.95 y 246 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, respectivamente; y se incluyeron en una matriz de polietilenglicol para obtener nanopartículas poliméricas cargadas con AE. Las nanopartículas potenciaron los efectos letales y subletales de los AE

de menta y palmarosa contra *B. germanica*. Las nanopartículas se diseñaron debido a que algunos factores de los AE, como su baja solubilidad en agua, alta volatilidad y rápida oxidación de sus componentes, limitan su uso en aplicaciones a gran escala (Campos *et al.*, 2018; Werdin González *et al.*, 2017). Por lo que estos resultados sugieren que los nanoinsecticidas podrían utilizarse con éxito para controlar distintas plagas. De la misma manera, el AE de menta fue evaluado por Pang *et al.* (2020) contra el gorgojo de harina (*Tribolium castaneum*), el gorgojo de tabaco (*Lasioderma serricorne*) y *Liposcelis bostrychophila*, obteniendo concentraciones letales LC₅₀ que fueron de 18.1, 68.4 y 0.6 mg/L_{aire}, respectivamente.

En la misma línea, Matos *et al.* (2020) evaluaron los AE de anís estrella (*Illicium verum*) y clavo (*Eugenia caryophyllus*) contra el gorgojo (*Callosobruchus maculatus*) del caupí (*Vigna unguiculata*), que es una legumbre comestible en Asia y América (Lopes *et al.*, 2018). Los valores de las concentraciones letales LC₅₀ y LC₉₅ en la prueba de contacto se estimaron en 9.62 y 32.78, así como 1.27 y 11.95 µL/20 g, para los AE de anís estrella y clavo, respectivamente. En las pruebas de repelencia, ambos AE redujeron la cantidad de huevos e insectos. Cabe señalar que el gorgojo es un insecto de importancia en la industria agroalimentaria, ya que es muy común que aparezca en distintos cereales, por lo que esta aplicación podría extenderse a la conservación de otros productos como el sorgo, arroz, trigo y cebada, entre otros.

3.3. Efecto de los aceites esenciales sobre la microbiota de animales

El uso dietético de los antibióticos se ha aprovechado durante décadas en la producción animal; sin embargo, la creciente preocupación pública por los posibles riesgos para la salud y las repercusiones ambientales del uso excesivo de antibióticos como promotores del crecimiento en la producción animal ha dado lugar a la prohibición de su aplicación dietética en algunos países. Por lo cual, las industrias que intervienen en la cadena

de producción animal, incluidos los productores primarios, los procesadores, los distribuidores y los minoristas, buscan constantemente sustancias eficaces, seguras y rentables con propiedades similares (Simitzis, 2017).

Debido a esto, los AE tienen el potencial de convertirse en una nueva generación de productos para la nutrición y la salud animal, debido a sus efectos positivos en la digestión, la comunidad microbiana intestinal, el rendimiento del crecimiento y el bienestar (Bento *et al.*, 2013; Bianchini *et al.*, 2014; Giannenas *et al.*, 2013).

Los efectos de los suplementos dietéticos de los AE en la microbiota intestinal, la morfología y la actividad enzimática y los parámetros de rendimiento del crecimiento han sido estudiados ampliamente, en especial en pollos de engorda (Alp *et al.*, 2012; Abudabos y Alyemni, 2013; Khattak *et al.*, 2014; Bozkurt *et al.*, 2016). En general, los AE parecen suprimir los microorganismos dañinos, estimulan la microbiota benéfica como *Lactobacillus*, regulan la actividad de las enzimas y protegen las vellosidades intestinales, pero no propician el aumento de peso corporal. La disminución del número de bacterias patógenas en el intestino y el mantenimiento de un equilibrio bacteriano adecuado entre el número de bacterias benéficas y las bacterias dañinas en el intestino parecen mejorar la capacidad de las células epiteliales para regenerar las vellosidades y así mejorar la capacidad de absorción intestinal (Bozkurt *et al.*, 2016).

Por otro lado, el efecto de los AE también se ha estudiado en la alimentación de peces. Giannenas *et al.* (2012) evaluaron un producto comercial encapsulado que contenía los principales componentes (carvacrol y timol) del AE de tomillo (*Thymus vulgaris*), en la dieta de la trucha arcoíris. El objetivo de su trabajo fue evaluar el efecto de los diferentes tratamientos dietéticos en las poblaciones de bacterias intestinales; se emplearon técnicas microbiológicas convencionales con medios de agar selectivo. Tanto el carvacrol como el timol modularon las comunidades microbianas intestinales al reducir las bacterias anaeróbicas totales, mientras que las cargas de lactobacilos fueron menores en el grupo tratado con timol en comparación con los

grupos tratados con carvacrol y el de control. De igual forma, Ran *et al.* (2016) evaluaron los efectos de un producto comercial de mezcla de timol y carvacrol en tilapia híbrida (*Oreochromis niloticus*); después de 6 semanas de alimentación observaron un cambio positivo en la microbiota intestinal de la tilapia.

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Los compuestos químicos derivados de fuentes naturales, como los aceites esenciales aquí estudiados, han demostrado su eficacia como antimicrobianos. Sin embargo, es importante enfatizar que el método de aplicación de dichos aceites esenciales o sus componentes dependerá de factores como el alimento a tratar y el tipo de microorganismos a eliminar. Asimismo, el reto actual radica en su uso para incrementar la seguridad alimentaria sin afectar la calidad del producto, en especial sus atributos sensoriales. En este contexto, el análisis sensorial de alimentos tratados con aceites esenciales o sus componentes es escaso, y abre un campo de investigación para identificar las preferencias de los consumidores. Por otro lado, el uso de aceites esenciales en las diferentes etapas de la cadena de producción de alimentos es prometedor, lo que podría favorecer la disminución de su costo, a fin de que el empleo de conservadores naturales sea competitivo frente a otros procesos de conservación convencionales.

AGRADECIMIENTOS

S. L. Recio Cázares 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 para sus estudios de doctorado.

REFERENCIAS

- Abdeldaiem, M. H., Ali, H. G. y Ramadan, M. F. (2017). Impact of different essential oils on the characteristics of refrigerated carp (*Cyprinus carpio*) fish fingers. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11(3), 1412-1420.
- Abudabos, A. M. y Alyemni, A. H. (2013). The effect of feeding a commercial essential oil product to broilers challenged with *Clostridium perfringens*. *African Journal of Microbiology Research*, 7(36), 4539-4545.
- Agrimonti, C., White, J., Tonetti, S. y Marmiroli, N. (2019). Antimicrobial activity of cellulosic pads amended with emulsions of essential oils of oregano, thyme and cinnamon against microorganisms in minced beef meat. *International Journal of Food Microbiology*, 305, 108246.
- Alfonzo, A., Martorana, A., Guerrasi, V., Barbera, M., Gaglio, R., Santulli, A., Settanni L., Galati A., Moschetti G. y Francesca, N. (2017). Effect of the lemon essential oils on the safety and sensory quality of salted sardines (*Sardina pilchardus* Walbaum 1792). *Food Control*, 73, 1265-1274.
- Alp, M., Midilli, M., Kocabəğlı, N., Yilmaz, H., Turan, N., Gargılı, A. y Acar, N. (2012). The effects of dietary oregano essential oil on live performance, carcass yield, serum immunoglobulin G level, and oocyst count in broilers. *Journal of Applied Poultry Research*, 21(3), 630-636.
- Amiri, E., Aminzare, M., Azar, H. H. y Mehrasbi, M. R. (2019). Combined antioxidant and sensory effects of corn starch films with nanoemulsion of *Zataria multiflora* essential oil fortified with cinnamaldehyde on fresh ground beef patties. *Meat Science*, 153, 66-74.
- Artiga-Artigas, M., Guerra-Rosas, M., Morales-Castro, J., Salvia-Trujillo, L. y Martín-Belloso, O. (2018). Influence of essential oils and pectin on nanoemulsion formulation: a ternary phase experimental approach. *Food Hydrocolloids*, 81, 209-219.
- Badola, R., Panjagari, N. R., Singh, R. R. B., Singh, A. K. y Prasad, W. G. (2018). Effect of clove bud and curry leaf essential oils on the anti-oxidative and anti-microbial activity of burfi, a milk-based confection. *Journal of Food Science and Technology*, 55(12), 4802-4810.
- Bedini, S., Flamini, G., Ascrizzi, R., Venturi, F., Ferroni, G., Bader, A., Girardi, J. y Conti, B. (2018). Essential oils sensory quality and their bioactivity against the mosquito *Aedes albopictus*. *Scientific Reports*, 8(1), 17857.
- Bento, M. H. L., Ouwehand, A. C., Tiihonen, K., Lahtinen, S., Nurminen, P., Saarinen, M. T., Schulze, H., Mygind, T. y Fischer, J. (2013). Essential oils and their

- use in animal feeds for monogastric animals – Effects on feed quality, gut microbiota, growth performance and food safety: a review. *Veterinarni Medicina*, 58(9), 449-458.
- Bhavaniramya, S., Vishnupriya, S., Al-Aboody, M. S., Vijayakumar, R. y Baskaran, D. (2019). Role of essential oils in food safety: Antimicrobial and antioxidant applications. *Grain & Oil Science and Technology*, 2(2), 49-55.
- Bianchini, A., Stratton, J., Weier, S., Cano, C. y Garcia, L. M. (2014). Use of essential oils and plant extracts to control microbial contamination in pet food products. *Journal of Food Processing and Technology*, 5, 357.
- Budka, D. y Khan, N. (2010). The effect of *Ocimum basilicum*, *Thymus vulgaris*, *Origanum vulgare* essential oils on *Bacillus cereus* in rice-based foods. *European Journal of Biological Sciences*, 2(1), 17-20.
- Bozkurt, M., Ege, G., Aysul, N., Akşit, H., Tüzün, A. E., Küçükıymaz, K., Borum, A. E., Uygun, M., Akşit, D., Aypak, S., Şimşek, E., Seyrek, K., Koçer, B., Bintas, E., y Oropour, A. (2016). Effect of anticoccidial monensin with oregano essential oil on broilers experimentally challenged with mixed *Eimeria* spp. *Poultry Science*, 95(8), 1858-1868.
- Burt, S. (2004). Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods—a review. *International Journal of Food Microbiology*, 94(3), 223-253.
- Campolo, O., Cherif, A., Ricupero, M., Siscaro, G., Grissa-Lebdi, K., Russo, A., Cucci, L. M., Di Pietro, P., Satriano, C., Desneux, N., Biondi, A., Zappalà, L., y Palmeri, V. (2017). Citrus peel essential oil nanoformulations to control the tomato borer, chemical properties and biological activity. *Scientific Reports*, 7(1), 13036.
- Campos, E. V. R., Proença, P. L. F., Oliveira, J. L., Bakshi, M., Abhilash, P. C. y Fraceto, L. F. (2018). Use of botanical insecticides for sustainable agriculture: future perspectives. *Ecological Indicators*, 105, 483-495.
- Cava, R., Nowak, E., Taboada, A. y Marin-Iniesta, F. (2007). Antimicrobial activity of clove and cinnamon essential oils against *Listeria monocytogenes* in pasteurized milk. *Journal of Food Protection*, 70(12), 2757-2763.
- Chen, W., Cheng, F., Swing, C. J., Xia, S. y Zhang, X. (2019). Modulation effect of core-wall ratio on the stability and antibacterial activity of cinnamaldehyde liposomes. *Chemistry and Physics of Lipids*, 223, 104790.
- Chia, T. W. R., Goulter, R. M., McMeekin, T., Dykes, G. A. y Fegan, N. (2009). Attachment of different *Salmonella* serovars to materials commonly used in a poultry processing plant. *Food Microbiology*, 26(8), 853-859.
- Císcarová, M., Tančinová, D., Medo, J., y Kačániová, M. (2016). The *in vitro* effect of selected essential oils on the growth and mycotoxin production of *Aspergillus* species. *Journal of Environmental Science and Health, Part. B, Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, 51(10), 668-674.
- Císcarová, M., Hleba, L., Medo, J., Tančinová, D., Mašková, Z., Čuboň, J., Kováčik A., Foltinová, D., Božík M. y Klouček, P. (2020). The *in vitro* and *in situ* effect of selected essential oils in vapour phase against bread spoilage toxicogenic *Aspergilli*. *Food Control*, 110, 107007.
- Coroneo, V., Carraro, V., Marras, B., Marrucci, A., Succa, S., Meloni, B., Pinna, A., Angioni, A., Sanna, A. y Schintu, M. (2017). Presence of Trihalomethanes in ready-to-eat vegetables disinfected with chlorine. *Food Additives and Contaminants*, 1-7.
- Cueva, C., Moreno-Arribas, M. V., Bartolomé, B., Salazar, Ó., Vicente, M. F. y Bills, G. F. (2011). Antibiosis of vineyard ecosystem fungi against food-borne microorganisms. *Research in Microbiology*, 162(10), 1043-1051.
- Cui, H., Li, W. y Lin, L. (2017). Antibacterial activity of liposome containing curry plant essential oil against *Bacillus cereus* in rice. *Journal of Food Safety*, 37(2), e12302.
- Dávila-Rodríguez, M., López-Malo, A., Palou, E., Ramírez-Corona, N., y Jiménez-Munguía, M. T. (2019). Antimicrobial activity of nanoemulsions of cinnamon, rosemary, and oregano essential oils on fresh celery. *LWT- Food Science and Technology*, 112(7), 108247.
- De Oliveira, M. M. M., Brugnera, D. F., do Nascimento, J. A., Batista, N. N. y Piccoli, R. H. (2012). Cinnamon essential oil and cinnamaldehyde in the control of bacterial biofilms formed on stainless steel surfaces. *European Food Research and Technology*, 234(5), 821-832.
- De Sousa Guedes, J. P., Da Costa Medeiros, J. A., De Souza e Silva, R. S., De Sousa, J. M. B., da Conceição, M. L. y de Souza, E. L. (2016). The efficacy of *Mentha arvensis* L. and *M. piperita* L. essential oils in reducing pathogenic bacteria and maintaining quality characteristics in cashew, guava, mango, and pineapple juices. *International Journal of Food Microbiology*, 238, 183-192.
- Dehghani, P., Hosseini, S. M. H., Golmakan, M.-T., Majdinasab, M. y Esteghlal, S. (2018). Shelf-life extension of refrigerated rainbow trout fillets using total Farsi gum-based coatings containing clove and thyme essential oils emulsions. *Food Hydrocolloids*, 77, 677-688.
- Diniz-Silva, H. T., Batista de Sousa, J., da Silva Guedes, J., Ramos do Egypio Queiroga, R. de C., Madruga, M. S., Tavares, J. F. y Magnani, M. (2019). A synergistic mixture of *Origanum vulgare* L. and *Rosmarinus officinalis* L. essential oils to preser-

- ve overall quality and control *Escherichia coli* O157:H7 in fresh cheese during storage. *LWT - Food Science and Technology*, 112, 107781.
- Dos Passos Braga, S., Lundgren, G. A., Macedo, S. A., Tavares, J. F., Dos Santos Vieira, W. A., Câmara, M. P. S. y De Souza, E. L. (2019). Application of coatings formed by chitosan and *Mentha* essential oils to control anthracnose caused by *Colletotrichum gloesporioides* and *C. brevisporum* in papaya (*Carica papaya* L.) fruit. *International Journal of Biological Macromolecules*, 139, 631-639.
- Duffy, L. L., O'Callaghan, D., McAuley, C. M., Fegan, N. y Craven, H. M. (2009). Virulence properties of *Escherichia coli* isolated from Australian dairy powder factory environments. *International Dairy Journal*, 19(3), 178-179.
- Emir Çoban, Ö., Patir, B. y Yilmaz, Ö. (2014). Protective effect of essential oils on the shelf life of smoked and vacuum-packed rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* W.1792) fillets. *Journal of Food Science and Technology*, 51(10), 2741-2747.
- Falcó, I., Verdeguer, M., Aznar, R., Sánchez, G. y Randazzo, W. (2018). Sanitizing food contact surfaces by the use of essential oils. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 51, 220-228.
- Faleiro, M. L. (2011). The mode of antibacterial action of essential oils. En A. Méndez Vilas (Ed.), *Science Against Microbial Pathogens: Communicating Current Research and Technological Advances* (pp. 1143-1156). Brown Walker Press.
- Fathi, M., Vinceković, M., Jurić, S., Viskić, M., Režek Jambrak, A. y Donsi, F. (2019). Food-grade colloidal systems for the delivery of essential oils. *Food Reviews International*, 37(11), 1-45.
- Fisher, K. y Phillips, C. A. (2006). The effect of lemon, orange and bergamot essential oils and their components on the survival of *Campylobacter jejuni*, *Escherichia coli* O157, *Listeria monocytogenes*, *Bacillus cereus* and *Staphylococcus aureus* *in vitro* and in food systems. *Journal of Applied Microbiology*, 101(6), 1232-1240.
- Frankova, A., Smid, J., Bernardos, A., Finkousova, A., Marsik, P., Novotny, D., Legarová, V., Pulkrabek, J. y Kloucek, P. (2016). The antifungal activity of essential oils in combination with warm air flow against postharvest phytopathogenic fungi in apples. *Food Control*, 68(1-2), 62-68.
- García-Ceja, A. y López-Malo, A. (2012). Biopolímeros utilizados en la encapsulación. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 6(1), 84-97.
- Ghabraie, M., Dang Vu, K., Tata, L., Salmieri, S. y Lacroix, M. (2016). Antimicrobial effect of essential oils in combinations against five bacteria and their effect on sensorial quality of ground meat. *LWT - Food Science and Technology*, 66, 332-339.
- Giannenas, I., Triantafillou, E., Stavrakakis, S., Margaroni, M., Mavridis, S., Steiner, T. y Karagouni, E. (2012). Assessment of dietary supplementation with carvacrol or thymol containing feed additives on performance, intestinal microbiota and antioxidant status of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 350-353, 26-32.
- Giannenas, I., Bonos, E., Christaki, E. y Florou-Paneri, P. (2013). Essential oils and their applications in animal nutrition. *Medicinal and Aromatic Plants*, 2(6), 1-12.
- Gómez-Estaca, J., López-de-Dicastillo, C., Hernández-Muñoz, P., Catalá, R. y Gavara, R. (2014). Advances in antioxidant active food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, 35(1), 42-51.
- Goñi, P., López, P., Sánchez, C., Gómez-Lus, R., Becerril, R. y Nerín, C. (2009). Antimicrobial activity in the vapour phase of a combination of cinnamon and clove essential oils. *Food Chemistry*, 116(4), 982-989.
- Gyawali, R. e Ibrahim, S. A. (2014). Natural products as antimicrobial agents. *Food Control*, 46, 412-429.
- Halden, R. U. (2014). On the need and speed of regulating triclosan and triclocarban in the United States. *Environmental Science and Technology*, 48(7), 3603-3611.
- Hashem, A. S., Awadalla, S. S., Zayed, G. M., Maggi, F. y Benelli, G. (2018). *Pimpinella anisum* essential oil nanoemulsions against *Tribolium castaneum*-insecticidal activity and mode of action. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(19), 18802-18812.
- He, Q., Li, Z., Yang, Z., Zhang, Y. y Liu, J. (2019). A superchilling storage-ice glazing (ss-IC) of Atlantic salmon (*Salmo salar*) sashimi fillets using coating protective layers of *Zanthoxylum* essential oils (eos). *Aquaculture*, 514, 734506.
- Huang, Z., Liu, X., Jia, S., Zhang, L. y Luo, Y. (2018). The effect of essential oils on microbial composition and quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fillets during chilled storage. *International Journal of Food Microbiology*, 266, 52-59.
- Jahani, M., Pira, M. y Aminifarid, M. H. (2020). Antifungal effects of essential oils against *Aspergillus niger* *in vitro* and *in vivo* on pomegranate (*Punica granatum*) fruits. *Scientia Horticulturae*, 264, 109188.
- Jang, S., Shin, Y. J. y Song, K. B. (2011). Effect of rapeseed protein-gelatin film containing grapefruit seed extract on 'Maehyang' strawberry quality. *In-*

- ternational Journal of Food Science and Technology*, 46(3), 620-625.
- Jiang, T., Luo, Z. y Ying, T. (2015). Fumigation with essential oils improves sensory quality and enhanced antioxidant ability of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*). *Food Chemistry*, 172, 692-698.
- Jin, W., Xu, W., Liang, H., Li, Y., Liu, S. y Li, B. (2016). Nanoemulsions for food: Properties, production, characterization and applications. En A. M. Grumezescu (Ed.), *Emulsions. Nanotechnology in the Agri-Food Industry Volume 3* (pp. 1-36). Academic Press.
- Karan, T., Şimşek, S., Yıldız, I. y Erenler, R. (2018). Chemical composition and insecticidal activity of *Origanum syriacum* L. Essential oil against *Sitophilus oryzae* and *Rhyzopertha dominica*. *International Journal of Secondary Metabolite*, 5, 87-93.
- Khattak, F., Ronchi, A., Castelli, P. y Sparks, N. (2014). Effects of natural blend of essential oil on growth performance, blood biochemistry, caecal morphology, and carcass quality of broiler chickens. *Poultry Science*, 93(1), 132-137.
- Khorasani, S., Danaei, M. y Mozafari, M. R. (2018). Nanoliposome technology for the food and nutraceutical industries. *Trends in Food Science and Technology*, 79, 106-115.
- Lin, L., Gu, Y., Sun, Y. y Cui, H. (2019). Characterization of chrysanthemum essential oil triple-layer liposomes and its application against *Campylobacter jejuni* on chicken. *LWT - Food Science and Technology*, 107, 16-24.
- Lin, L., Zhu, Y., Thangaraj, B., Abdel-Samie, M. A. y Cui, H. (2018). Improving the stability of thyme essential oil solid liposome by using β -cyclodextrin as a cryoprotectant. *Carbohydrate Polymers*, 188, 243-251.
- Lopes, L. M., Sousa, A. H., Santos, V. B., Silva, G. N. y Abreu, A. O. (2018). Development rates of *Callosobruchus maculatus* (Coleoptera: chrysomelidae) in landrace cowpea varieties occurring in southwestern Amazonia. *Journal of Stored Products Research*, 76, 111-115.
- Lorenzo-Leal, A. C., Palou, E. y López-Malo, A. (2019). Evaluation of the efficiency of allspice, thyme and rosemary essential oils on two foodborne pathogens in in-vitro and on alfalfa seeds, and their effect on sensory characteristics of the sprouts. *International Journal of Food Microbiology*, 295, 19-24.
- Maccioni, A., Santo, A., Falconieri, D., Piras, A., Manconi, M., Maxia, A. y Bacchetta, G. (2019). Inhibitory effect of rosemary essential oil, loaded in liposomes, on seed germination of *Acacia saligna*, an invasive species in Mediterranean ecosystems. *Botany*, 97(5), 283-291.
- Mahdavi, V., Hosseini, S. E. y Sharifan, A. (2017). Effect of edible chitosan film enriched with anise (*Pimpinella anisum* L.) essential oil on shelf life and quality of the chicken burger. *Food Science and Nutrition*, 6(2), 269-279.
- Mani López, E., Valle Vargas, G. P., Palou, E. y López-Malo, A. (2018). *Penicillium expansum* inhibition on bread by lemongrass essential oil in vapor phase. *Journal of Food Protection*, 81(3), 467-471.
- Manning, L. (2015). Categorizing food related illness: have we got it right? *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(9), 1938-1949.
- Matos, L. F., Barbosa, D. R., Lima, E. D., Dutra, K. D., Navarro, D. M., Alves, J. L. y Silva, G. N. (2020). Chemical composition and insecticidal effect of essential oils from *Illicium verum* and *Eugenia caryophyllus* on *Callosobruchus maculatus* in cowpea. *Industrial Crops and Products*, 145, 112088.
- McClements, D. J. (2011). Edible nanoemulsions: Fabrication, properties, and functional performance. *Soft Matter*, 7(6), 2297-2316.
- Mejía-Garibay, B., Palou, E. y López-Malo, A. (2015). Composition, diffusion, and antifungal activity of black mustard (*Brassica nigra*) essential oil when applied by direct addition or vapor phase contact. *Journal of Food Protection*, 78(4), 843-848.
- Michalczyk, M., Macura, R., Tesarowicz, I. y Banaś, J. (2012). Effect of adding essential oils of coriander (*Coriandrum sativum* L.) and hyssop (*Hyssopus officinalis* L.) on the shelf life of ground beef. *Meat Science*, 90(3), 842-850.
- Nikkhah, M. y Hashemi, M. (2020). Boosting antifungal effect of essential oils using combination approach as an efficient strategy to control postharvest spoilage and preserving the jujube fruit quality. *Postharvest Biology and Technology*, 164, 111159.
- Mossa, A.-T. (2016). Green pesticides: essential oils as biopesticides in insect-pest management. *Journal of Environmental Science and Technology*, 9(5), 354-378.
- Osés, J., Fernández-Pan, I., Mendoza García, E. M. y Maté, J. I. (2009). Stability of the mechanical properties of edible films based on whey protein isolate during storage at different relative humidity. *Food Hydrocolloids*, 23(1), 125-131.
- Otoni, C. G., de Moura, M. R., Aouada, F. A., Camillotto, G. P., Cruz, R. S., Lorevice, M. M., Soares, N. de F. F. y Mattoso L. H. C. (2014). Antimicrobial and physical-mechanical properties of pectin/papaya puree/cinnamaldehyde nanoemulsion edible composite films. *Food Hydrocolloids*, 41(41), 188-194.
- Ozogul, Y., Yuvka, İ., Ucar, Y., Durmus, M., Köske, A. R., Öz, M. y Ozogul, F. (2017). Evaluation of effects of nanoemulsion based on herb essential oils (rosemary, laurel, thyme and sage) on sensory, chemical and microbiological quality of

- rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets during ice storage. *LWT - Food Science and Technology*, 75, 677-684.
- Pang, X., Feng, Y. X., Qi, X. J., Wang, Y., Almaz, B., Xi, C. y Du, S.S. (2020). Toxicity and repellent activity of essential oil from *Mentha piperita* Linn. leaves and its major monoterpenoids against three stored product insects. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 7618-7627.
- Parra, D. F., Tadini, C. C., Ponce, P. y Lugao, A. B. (2004). Mechanical properties and water vapor transmission in some blends of cassava starch edible films. *Carbohydrate Polymers*, 58(4), 475-481.
- Pateiro, M., Barba, F. J., Domínguez, R., Sant'Ana, A. S., Mousavi Khaneghah, A., Gavahian, M. y Lorenzo, J. M. (2018). Essential oils as natural additives to prevent oxidation reactions in meat and meat products: a review. *Food Research International*, 113, 156-166.
- Pedrós-Garrido, S., Clemente, I., Calanche, J. B., Condón-Abanto, S., Beltrán, J. A., Lyng, J. G., Brunton, N., Bolton D. y Whyte, P. (2020). Antimicrobial activity of natural compounds against *Listeria* spp. and their effects on sensory attributes in salmon (*Salmo salar*) and cod (*Gadus morhua*). *Food Control*, 107, 106768.
- Pereira, L. A. S., Oliveira, M. M. M. de, Martins, H. H. de A., Vale, L. A. do, Isidoro, S. R., Botrel, D. A. y Piccoli, R. H. (2019). Sanitizing cinnamaldehyde solutions against *Pseudomonas aeruginosa* biofilms formed on stainless steel surfaces. *Brazilian Journal of Food Technology*, 22(0), 1-8.
- Perricone, M., Arace, E., Corbo, M. R., Sinigaglia, M. y Bevilacqua, A. (2015). Bioactivity of essential oils: a review on their interaction with food components. *Frontiers in Microbiology*, 6(76), 1-5.
- Phillips, C. A. (2016). Bacterial biofilms in food processing environments: a review of recent developments in chemical and biological control. *International Journal of Food Science and Technology*, 51(8), 1731-1743.
- Pourya, M., Sadeghi, A., Ghobari, H., Taning, C. N. T. y Smagghe, G. (2018). Bioactivity of *Pistacia atlantica* Desf. Subsp. *Kurdica* (Zohary) Rech. F. and *Pistacia khinjuk* Stocks essential oils against *Callosobruchus maculatus* (F, 1775) (Coleoptera: Bruchidae) under laboratory conditions. *Journal of Stored Products Research*, 77, 96-105.
- Prakash, B. y Kiran, S. (2016). Essential oils: a traditionally realized natural resource for food preservation. *Current Science*, 110(10), 1890-1892.
- Reyes-Jurado, F., Navarro-Cruz, A. R., Ochoa-Velasco, C. E., Palou, E., López-Malo, A. y Ávila-Sosa, R. (2019). Essential oils in vapor phase as alternative antimicrobials: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1-10.
- Ribeiro-Santos, R., Andrade, M., de Melo, N. R. y Sanches-Silva, A. (2017). Use of essential oils in active food packaging: recent advances and future trends. *Trends in Food Science & Technology*, 61, 132-140.
- Saifullah, M., Islam Shishir, M. R., Ferdowsi, R., Tanver Rahman, M. R. y Van Vuong, Q. (2019). Micro and nano encapsulation, retention and controlled release of flavor and aroma compounds: a critical review. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 230-251.
- Sánchez Aldana, D., Contreras-Esquivel, J. C., Nevárez-Moorillón, G. V. y Aguilar, C. N. (2014). Caracterización de películas comestibles a base de extractos pécticos y aceite esencial de limón mexicano. *CyTA - Journal of Food*, 13(1), 17-25.
- Sánchez, G. y Aznar, R. (2015). Evaluation of natural compounds of plant origin for inactivation of enteric viruses. *Food and Environmental Virology*, 7(2), 183-187.
- Scotter, M. J. y Castle, L. (2004). Chemical interactions between additives in foodstuffs: a review. *Food Additives and Contaminants*, 21(2), 93-124.
- Servili, A., Feliziani, E. y Romanazzi, G. (2017). Exposure to volatiles of essential oils alone or under hypobaric treatment to control postharvest gray mold of table grapes. *Postharvest Biology and Technology*, 133, 36-40.
- Sharma, H., Mendiratta, S. K., Agarwal, R. K., Kumar, S. y Soni, A. (2017). Evaluation of antioxidant and anti-microbial activity of various essential oils in fresh chicken sausages. *Journal of Food Science and Technology*, 54(2), 279-292.
- Shidhaye, S. S., Vaidya, R., Sutar, S., Patwardhan, A. y Kadam, V. J. (2008). Solid lipid nanoparticles and nanostructured lipid carriers - Innovative generations of solid lipid carriers. *Current Drug Delivery*, 5(4), 324-331.
- Silano, M. y Silano, V. (2015). Food and feed chemical contaminants in the European Union: regulatory, scientific, and technical issues concerning chemical contaminants occurrence, risk assessment, and risk management in the European Union. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(10), 2162-2217.
- Simitzis, P. (2017). Review. Enrichment of animal diets with essential oils-a great perspective on improving animal performance and quality characteristics of the derived product. *Medicines*, 4(35), 1-21.
- Singh, P. y Gandhi, N. (2015). Milk preservatives and adulterants: processing, regulatory and safety issues. *Food Reviews International*, 31(3), 236-261.
- Šojić, B., Pavlić, B., Tomović, V., Ikonić, P., Zeković, Z., Kocić-Tanackov, S., Đurović S., Škaljac, S., Jokanović, M. e Ivić, M. (2019). Essential oil versus supercritical

- fluid extracts of winter savory (*Satureja montana* L.) - Assessment of the oxidative, microbiological and sensory quality of fresh pork sausages. *Food Chemistry*, 287, 280-286.
- Solórzano-Santos, F. y Miranda-Novales, M. G. (2012). Essential oils from aromatic herbs as antimicrobial agents. *Current Opinion in Biotechnology*, 23(2), 136-141.
- Soncu, E. D., Arslan, B., Ertürk, D., Küçükaya, S., Özdemir, N. y Soyer, A. (2018). Microbiological, physicochemical and sensory characteristics of Turkish fermented sausages (sucuk) coated with chitosan-essential oils. *LWT*, 97, 198-204.
- Szűcs, V., Szabó, E., Guerrero, L., Tarcea, M. y Bánáti, D. (2019). Modelling of avoidance of food additives: a cross country study. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 70, 1020-1032.
- Tongnuanchan, P. y Benjakul, S. (2014). Essential oils: extraction, bioactivities, and their uses for food preservation. *Journal of Food Science*, 79, 1231-1249.
- Umaraw, P., Munekata, P. E. S., Verma, A. K., Barba, F. J., Singh, V. P., Kumar, P. y Lorenzo, J. M. (2020). Edible films/coating with tailored properties for active packaging of meat, fish and derived products. *Trends in Food Science & Technology*, 98, 10-24.
- Utami, R., Khasanah, L. U., Manuhara, G. J. y Ayuningrum, Z. K. (2019). Effects of cinnamon bark essential oil (*Cinnamomum burmannii*) on characteristics of edible film and quality of fresh beef. *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science*, 42(4), 1173-1184.
- Valencia-Sullca, C., Jiménez, M., Jiménez, A., Atares, L., Vargas, M. y Chiralt, A. (2016). Influence of liposome encapsulated essential oils on properties of chitosan films. *Polymer International*, 65(8), 979-987.
- Valeriano, C., de Oliveira, T. L. C., de Carvalho, S. M., Cardoso, M. das G., Alves, E. y Piccoli, R. H. (2012). The sanitizing action of essential oil-based solutions against *Salmonella enterica* serotype Enteritidis S64 biofilm formation on AISI 304 stainless steel. *Food Control*, 25(2), 673-677.
- Vasilijević, B., Mitić-Ćulafić, D., Djekic, I., Marković, T., Knežević-Vukčević, J., Tomasevic, I. y Nikolić, B. (2019). Antibacterial effect of *Juniperus communis* and *Satureja montana* essential oils against *Listeria monocytogenes* in vitro and in wine marinated beef. *Food Control*, 100, 247-256.
- Vatavali, K., Karakosta, L., Nathanaelides, C., Georgantelis, D. y Kontominas, M. G. (2013). Combined effect of chitosan and oregano essential oil dip on the microbiological, chemical, and sensory attributes of red gorgy (*Pagrus pagrus*) stored in ice. *Food and Bioprocess Technology*, 6(12), 3510-3521.
- Velázquez-Contreras, C., Osorio-Revilla, G. y Gallardo-Velázquez, T. (2014). Encapsulation of orange oil in spout-fluid bed dryer with a draft tube on a bed of inert solids. *Drying Technology*, 32(14), 1718-1726.
- Vital, A. C. P., Guerrero, A., Kempinski, E. M. B. C., Monteschio, J. O., Sary, C., Ramos, T. R. Campo, M. D. M. y do Prado, I. N. (2018). Consumer profile and acceptability of cooked beef steaks with edible and active coating containing oregano and rosemary essential oils. *Meat Science*, 143, 153-158.
- Vital, A. C. P., Guerrero, A., Ornaghi, M. G., Kempinski, E. M. B. C., Sary, C., Monteschio, J. O., Matumoto-Pintor, P. T., Ribeiro, R. P. y do Prado, I. N. (2018). Quality and sensory acceptability of fish fillet (*Oreochromis niloticus*) with alginate-based coating containing essential oils. *Journal of Food Science and Technology*, 55(12), 4945-4955.
- Walker, R. M., Decker, E. A. y McClements, D. J. (2015). Physical and oxidative stability of fish oil nanoemulsions produced by spontaneous emulsification: effect of surfactant concentration and particle size. *Journal of Food Engineering*, 164, 10-20.
- Werdin González, J. O., Jesser, E. N., Yeguerman, C. A., Ferrero, A. A. y Fernández Band, B. (2017). Polymer nanoparticles containing essential oils: new options for mosquito control. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(20), 17006-17015.
- Wu, Z., Zhou, W., Pang, C., Deng, W., Xu, C. y Wang, X. (2019). Multifunctional chitosan-based coating with liposomes containing laurel essential oils and nano-silver for pork preservation. *Food Chemistry*, 295, 16-25.
- Xue, R., Shi, H., Ma, Y., Yang, J., Hua, B., Inniss, E. C., Adams, C. D. y Eichholz, T. (2017). Evaluation of thirteen haloacetic acids and ten trihalomethanes formation by peracetic acid and chlorine drinking water disinfection. *Chemosphere*, 189, 349-356.
- Yeguerman, C., Jesser, E., Massiris, M., Delrieux, C., Murray, A. P. y Werdin González, J. O. (2020). Insecticidal application of essential oils loaded polymeric nanoparticles to control German cockroach: design, characterization and lethal/sublethal effects. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 189, 110047.
- Yemiş, G. P. y Candoğan, K. (2017). Antibacterial activity of soy edible coatings incorporated with thyme and oregano essential oils on beef against pathogenic bacteria. *Food Science and Biotechnology*, 26(4), 1113-1121.
- Yeom, H-J., Lee, H-Y., Lee, S-C., Lee, J-E., Seo, S-M. y Park, I-K. (2018). Insecticidal activity of *Lamiaceae* plant essential oils and their constituents against *Blattella germanica* L. Adult. *Journal of Economic Entomology*, 111, 653-661.



Uso de gomas naturales en la microencapsulación de pigmentos (antocianinas, betalaínas y carotenoides) mediante secado por atomización y liofilización

O., Jiménez- González* y J.A., Guerrero-Beltrán

*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos
Correo electrónico: oscar.jimenezg@udlap.mx • angel.guerrero@udlap.mx

RESUMEN

La microencapsulación es útil para la conservación y estabilidad de pigmentos. Los métodos más utilizados son el secado por atomización y la liofilización; ambos métodos requieren agentes encapsulantes. Las gomas de origen natural se han convertido en un ingrediente importante, ofreciendo múltiples beneficios estructurales para la microcápsula y protectores para el componente activo. La goma arábiga, goma de mezquite, goma xantana y goma guar, han sido probadas en la microencapsulación de antocianinas, betalaínas y carotenoides. El uso de estas gomas incrementa la estabilidad de los pigmentos, además, su empleo permite la obtención de colorantes en polvo de fácil incorporación a matrices alimenticias complejas. El objetivo de esta revisión es presentar el uso que tienen estas gomas en la encapsulación de pigmentos mediante el secado por atomización y liofilización; además de discutir los factores que afectan su estabilidad y analizar los trabajos que han llevado a cabo la incorporación en matrices alimenticias.

Palabras clave: microencapsulación, secado por atomización, liofilización, pigmentos, gomas naturales.

ABSTRACT

Microencapsulation is a useful technique for the preservation and stability of pigments. The most commonly used methods are spray drying and freeze drying; both methods require encapsulating agents. Natural gums are important ingredients, as they offer numerous structural benefits for the microcapsule and protection for the core compounds. Gum arabic, mesquite gum, xanthan gum and guar gum, have been tested to encapsulate anthocyanins, betalains and carotenoids. It has been observed that these gums increase pigments' stability, in addition, their utilization allows the obtention of powder-state colorants that can be easily incorporated into food matrices. The aim of this review is to present the use of these gums in the encapsulation of pigments through spray drying and freeze drying; furthermore, to discuss factors that affect their stability, and to analyze the studies concerning the incorporation into food matrices.

Keywords: microencapsulation, spray drying, freeze drying, natural pigments, natural gums.

INTRODUCCIÓN

El color es uno de los aspectos sensoriales más importantes en la industria alimentaria, ya que puede modificar el comportamiento del consumidor, influenciando la selección, aceptabilidad, preferencia y deseo sobre un alimento (Clydesdale, 1993; Garber *et al.*, 2016; Paakki *et al.*, 2019; Piqueras-Fiszman y Spence, 2015; Wadhera y Capaldi-Phillips, 2014). El color agradable de un alimento puede ser un factor de calidad (Francis, 1995; Sukkhai *et al.*, 2018). Asimismo, el color de los alimentos ayuda a la identificación de sabores u olores (Garber *et al.*, 2016; Porcherot *et al.*, 2013; Spence, 2015; Spence *et al.*, 2010).

La adición de colorantes en alimentos permite dar uniformidad de color entre lotes de un mismo producto, aumentar la intensidad del color, obtener el color esperado de acuerdo con las expectativas del consumidor (por ejemplo, el color amarillo en helado de vainilla), restaurar el color que se ha perdido debido al procesamiento (por ejemplo, en la pasteurización de jugos), colorear alimentos que carecen de color (por ejemplo, refrescos, bebidas saborizadas, dulces, entre otros), o enmascarar características indeseables (Lehto *et al.*, 2017; Martins *et al.*, 2016; Scotter, 2011).

Los colorantes alimentarios se dividen en artificiales o sintéticos, idénticos a los naturales (análogos a los naturales, pero producidos sintéticamente) y naturales (Scotter, 2011). El término «colorante natural», puede referirse a extractos purificados o concentrados de frutas o vegetales ricos en pigmentos (Lehto *et al.*, 2017; Scotter, 2011). Existe una gran variedad de pigmentos presentes en la naturaleza, los cuales pueden ser extraídos y usarse en la industria alimentaria. En general, las antocianinas, betalaínas y carotenoides, son los pigmentos más estudiados, con múltiples tonalidades como azules-rojos-morados (antocianinas), amarillos-rojos (betalainas) y amarillos-naranjas-rojos (carotenoides) (Martins *et al.*, 2016; Rodriguez-Amaya, 2016; Rodriguez-Amaya, 2019).

El uso y consumo de pigmentos ha ganado importancia debido a que presentan propiedades benéficas para la salud humana, como la reducción de síntomas o prevención de enfermedades crónico-degenerativas o cardiovasculares, así como la protección de las funciones cognitivas, además, pueden actuar como anti-inflamatorios, analgésicos, entre otros (Chawla *et al.*, 2016; He y Giusti, 2010; Rodriguez-Amaya, 2016; Rodriguez-Amaya, 2019). Esto va de la mano con las nuevas tendencias del consumo de alimentos. Actualmente, los consumidores demandan alimentos

más saludables, de origen vegetal, ricos en antioxidantes y con menos aditivos artificiales (Martins *et al.*, 2016). No obstante, una de las principales desventajas del uso de estos pigmentos es la inestabilidad ante condiciones ambientales (pH, luz, oxígeno, temperatura, entre otros) y la dificultad al momento de su incorporación en alimentos (Ngamwonglumlert *et al.*, 2017; Rodriguez-Amaya, 2019). El desarrollo de pigmentos microencapsulados ha sido una de las principales opciones para su conservación, ya que de esta forma se incrementa su estabilidad (Castro-Enríquez *et al.*, 2019; Mahdavi *et al.*, 2014) y, en algunos casos, su solubilidad (De Marco *et al.*, 2013; Kshirsagar *et al.*, 2010). Al mismo tiempo, sirve como método de transporte de compuestos bioactivos y permite controlar la liberación de los mismos (Niu *et al.*, 2020; Ye *et al.*, 2018).

Se han utilizado diferentes agentes de encapsulación para la formación de la microcápsula. En especial, el uso de biopolímeros como las gomas provenientes de exudados de árboles y bacterias, o extraídas de semillas (Ahmad *et al.*, 2019; Hamdani *et al.*, 2019), las cuales presentan propiedades que ayudan a la formación de la pared y actúan como emulgentes (Hamdani *et al.*, 2019; Salarbashi y Tafaghodi, 2018), además de ser biocompatibles, biodegradables y seguras para su consumo (Gupta *et al.*, 2018). Se ha reportado el uso de gomas para la microencapsulación de pigmentos, como la goma arábiga, goma de mezquite, goma xantana, goma guar, entre otras (Antigo *et al.*, 2017; Ochoa-Velasco *et al.*, 2017; Pavón-García *et al.*, 2011; Ravichandran *et al.*, 2014; Venil *et al.*, 2016).

El objetivo de la presente revisión es proveer información acerca del uso de gomas naturales, en la encapsulación de pigmentos (antocianinas, betalaínas y carotenoides) mediante microencapsulación usando secado por atomización y liofilización, analizar el efecto de los factores de inestabilidad de pigmentos microencapsulados bajo diferentes condiciones de almacenamiento, así como la aplicación de los pigmentos en matrices alimenticias.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. Microencapsulación de pigmentos

La microencapsulación permite que diferentes compuestos, entre ellos pigmentos, sean recubiertos por una matriz polimérica (homogénea o heterogénea) (Zhang *et al.*, 2020). Dentro de los

factores que influyen en la formación de la microcápsula, se encuentran el tamaño y las características de la microcápsula (figura 1a), el método de encapsulación (químico, físico o fisicoquímico), las condiciones del proceso, el método de homogeneización y la naturaleza física y química de la solución debido a los agentes de encapsulación (Aguiar *et al.*, 2016; Gharsallaoui *et al.*, 2007).

Existen diferentes métodos de encapsulación para la conservación de compuestos activos naturales; no obstante, la liofilización y el secado por atomización son las técnicas más usadas (Corrêa *et al.*, 2019; Ephrem *et al.*, 2018; Labuschagne, 2018).

1.1. Obtención de pigmentos en polvo

1.1.1. Secado por atomización

El secado por atomización es la tecnología más utilizada para la microencapsulación, debido a que es barata, reproducible, capaz de operar en continuo y ofrece altos rendimientos (Bakry *et al.*, 2016; Çam *et al.*, 2014; Labuschagne, 2018). El proceso de microencapsulación mediante secado por atomización se basa en la eliminación de agua usando aire caliente y la reducción de tamaño de la gota mediante atomización (figura 1b) (Bakry *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2018). La eficiencia de encapsulación dependerá de los parámetros de operación (temperatura de entrada y salida, presión, flujo del aire de atomización y velocidad de alimentación) y del agente encapsulante. Diferentes autores han descrito el proceso de secado por atomización (Bakry *et al.*, 2016; Gharsallaoui *et al.*, 2007; Santos *et al.*, 2018), el cual se puede resumir en tres etapas principales:

i. Preparación de la mezcla de encapsulación. Esta puede llevarse a cabo por métodos físicos (agitación magnética, emulsión con un mezclador tipo *ultraturrax*, por ultrasonido o microfluidización) (Mahdi Jafari *et al.*, 2006; Santana *et al.*, 2016; Verma y Singh, 2015) o métodos químicos (coacervación simple o compleja; mayormente aplicada para pigmentos liposolubles, como los carotenoides) (Gomez-Estaca *et al.*, 2016; Jain *et al.*, 2016; Qv *et al.*, 2011; Shaddel *et al.*, 2018; Thakur *et al.*, 2017).

ii. Atomización. Durante esta etapa, la mezcla de alimentación se divide en pequeñas gotas, aumentando el área de contacto y mejorando la transferencia de energía y masa, lo cual agiliza la evaporación de agua (Santos *et al.*, 2018; Steiner

et al., 2018). La forma y tamaño de la gota dependerán del tipo de atomización y la naturaleza de la solución alimentada (Santos *et al.*, 2018).

iii. Deshidratación de la gota. Al entrar en contacto con el aire caliente (las temperaturas comúnmente usadas oscilan entre 150 y 220 °C), la transferencia de energía y masa ocurren de manera simultánea (figura 1b) (Bakry *et al.*, 2016; Gharsallaoui *et al.*, 2007). El proceso de deshidratación es casi instantáneo. Durante este, ocurre un incremento de la temperatura, difusión y evaporación del agua desde el centro hasta el exterior de la cápsula, encogimiento de la cápsula, concentración del material activo, y formación de la costra o pared (Dolinsky, 2001; Santos *et al.*, 2018).

1.1.2. Liofilización

La liofilización es el segundo método de microencapsulación más usado, pese a que los costos pueden aumentar entre 30 y 50 veces más que el método de secado por atomización. Es excepcionalmente tardado, ya que el secado por atomización se puede llevar a cabo en segundos y la liofilización puede tardar días. Sin embargo, la liofilización es ideal cuando el compuesto activo es altamente termolábil (Bakry *et al.*, 2016; Labuschagne, 2018) o cuando se desea retener todos los compuestos volátiles y/o preservar el color (Clark, 2009).

Durante la liofilización, la deshidratación ocurre después de la congelación bajo condiciones de vacío, lo cual propicia la sublimación (Morais *et al.*, 2016). El proceso básico se representa esquemáticamente en la figura 1c. Consta de tres etapas principales, la primera es el congelamiento, a temperaturas menores a 0 °C (entre -18 y -80 °C) durante algunas horas (Ravichandran *et al.*, 2014; Rezende *et al.*, 2018; Yu y Lv, 2019); esta etapa ayuda a controlar los cristales de hielo (orientación, tamaño y morfología) (Fang y Bhandari, 2012). Se recomiendan lotes pequeños cuando la matriz a deshidratar es líquida (solución acuosa o suspensión) (Fang y Bhandari, 2012).

Las siguientes dos etapas son las de deshidratación, en la primera ocurre la sublimación del agua y el transporte del vapor de agua a la cámara de condensación. Uno de los problemas durante esta etapa, se da cuando la vaporización del hielo deja poros abiertos, donde el oxígeno presente en el aire puede interactuar con el compuesto activo y propiciar su degradación (Fang y Bhandari, 2012; Kuck y Noreña, 2016; Ozkan *et al.*, 2019) o la su-

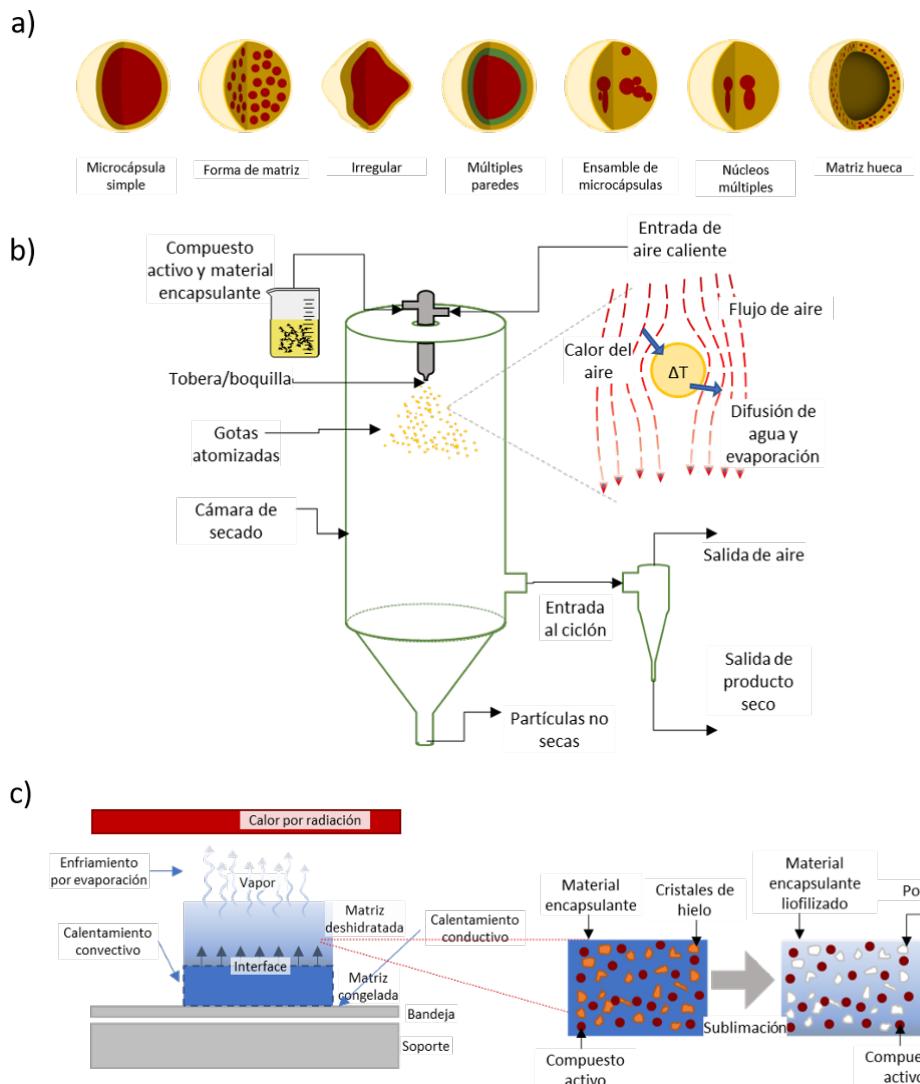


Figura 1.

Esquemas relacionados con la microencapsulación: a) tipos de microcápsula, b) proceso de deshidratación mediante secado por atomización, c) proceso de deshidratación mediante liofilización.

blimación incompleta debido a la formación de una barrera que impide el paso del vapor de agua (Kuck y Noreña, 2016). En la segunda etapa de deshidratación se aplica energía para remover el agua remanente (agua ligada / no congelable) (Clark, 2009; Fang y Bhandari, 2012). Una vez concluida esta etapa, el polvo se obtiene mediante un molido (manual o mecánico), lo que resulta en partículas irregulares y de tamaños diversos (Rezvankhah *et al.*, 2020).

1.2. Importancia de la temperatura de transición vítrea (T_g)

La temperatura de transición vítrea (T_g) es una propiedad

termofísica de los polímeros amorfos, la cual está relacionada con la identidad, peso molecular y concentración de los productos en la mezcla «compuesto activo-agente de encapsulación» (Bhandari y Howes, 1999; Santos *et al.*, 2018). Se trata del paso de un material amorfico a su estado cristalino. El aumento de la temperatura por encima de la de transición vítrea (superior a 10-20 °C) genera cambios en las propiedades físicas, como el incremento en la capacidad calorífica (C_p) y cambios en las propiedades viscoelásticas (Bhandari y Howes, 1999). Estos cambios en el secado por atomización

pueden propiciar que el producto se adhiera a las paredes de la cámara de secado o la aglomeración del producto (Santos *et al.*, 2018). Por otro lado, si durante la liofilización la temperatura de deshidratación es mayor a la T_g (conocida como temperatura de colapso) puede disminuir la viscosidad del material debido al cambio de la estructura sólida-cristalina a una gomosa-amorfa (Morais *et al.*, 2016); como resultado la estructura puede colapsar o deformarse y el producto final tener exceso de agua residual y problemas de rehidratación (Bhandari y Howes, 1999). Asimismo, a lo largo del almacenamiento, la T_g está relacionada con algunos mecanismos de deterioración de la microcápsula y del compuesto activo (Naik *et al.*, 2017).

Los compuestos presentes en los extractos usados para la encapsulación, como ácidos orgánicos o la fructosa, glucosa (monómeros) y sacarosa (disacárido), son de bajo peso molecular y, por consiguiente, de baja T_g –en los tres últimos, de 5, 31 y 62 °C, respectivamente–, a diferencia de la maltodextrina (MDX) de 10 ED (PM = 1800 g/mol), cuya T_g es de 160 °C. Por otro lado, el valor de la T_g se basa en las fracciones molares de los componentes en la mezcla, por lo que cada uno influye en el valor final de la T_g (Bhandari *et al.*, 1993). La adición de compuestos que incrementen la T_g , permite el secado a temperaturas más altas y ayuda a la formación de la pared que protege a los pigmentos (Zhang *et al.*, 2020). Los polímeros más comunes son hidrolizados de almidón como la MDX, almidones modificados, proteínas o gomas (Villacrez *et al.*, 2014). La selección del agente encapsulante dependerá de factores como la solubilidad, el peso molecular, la T_g , el punto de fusión, la cristalinidad, la difusividad, las propiedades para formar una película, y las propiedades emulgentes, además de la aplicación deseada del producto final (Bakry *et al.*, 2016; Gharsallaoui *et al.*, 2007).

2. Gomas usadas en la microencapsulación de pigmentos

Mahdavi *et al.* (2014) mencionan que en la microencapsulación los factores morfológicos del polvo, así como la baja humedad y actividad de agua, son tan importantes como la solubilidad y la higroscopidad, ya que en ellos se basa la estabilidad de los compuestos. Además, la interacción de los grupos funcionales, la estructura y el grado de ramificaciones presentes en las gomas, influye en la estabilidad de los pigmentos (Zhang *et al.*, 2020), dando como resultado que el uso de los diferentes agentes encapsulantes resulte en propiedades fisicoquímicas carac-

terísticas de cada uno de ellos. En la tabla I se muestran los trabajos realizados en los últimos años en la encapsulación de pigmentos con gomas. Asimismo, en la tabla II se resumen algunas de las características de las gomas mencionadas en esta revisión.

2.1. Goma arábiga o acacia

De las gomas mencionadas en este trabajo, la goma arábiga o goma acacia (GA) es la más utilizada para la encapsulación de pigmentos (tabla I). La goma arábiga (GA) es el exudado del árbol de *Acacia senegal* o *Acacia seyal* y es una molécula compleja (heteropolisacárido ramificado, tabla II), casi esférica (figura 2), constituida por un arabinogalactano o unidades de β -D galactopiranosil unidas por los carbonos 1 → 3 y 1 → 6 como cadena principal y ramificaciones β -D glucopiranosil ácido urónico unidas por los carbonos de 1 → 6. Estas cadenas pueden contener ácido glucurónico, galactopiranosa, arabinofuranosa y ramnosa (Nie *et al.*, 2013; Zhao *et al.*, 2015).

La GA presenta buena solubilidad en agua, puede formar una película que favorece la encapsulación de pigmentos, se usa como estabilizante, espesante (en solución acuosa presenta comportamiento newtoniano), gelificante, y emulgente (posiblemente por su fracción proteica de aproximadamente 2 %), puesto que permite la encapsulación de compuestos como los carotenoides (Gharsallaoui *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2020).

Se ha utilizado ampliamente en la encapsulación de antocianinas, betalaínas y carotenoides (tabla I). Como se mencionó, los factores morfológicos son importantes en la estabilidad. Zhang *et al.* (2020) compararon el uso de MDX, GA y la mezcla de ambos en la encapsulación de jugo de arándano. Los resultados de este estudio demostraron que las partículas fueron más esféricas, sin grietas o rupturas sobre la superficie, pero presentaban rugosidades. Los autores hipotetizan que la rugosidad puede deberse a la rápida formación de la costra por la presencia de la GA y la deshidratación desigual de la partícula, promoviendo un encogimiento irregular y mayor contenido de humedad. Estos resultados concuerdan con los de Yu y Lv (2019), quienes mencionan que las moléculas cuya cadena estructural es más larga impiden el paso o salida del agua de la microcápsula. Por el contrario, otros agentes de encapsulación, como la MDX, a pesar de ser capaces de formar una película, lo hacen con mayor lentitud y, si bien permiten una deshidratación más uniforme, el compuesto activo se encuentra más expuesto a ser deteriorado debido a la temperatura (Zhang *et al.*, 2020).

Tabla I. Secado por atomización y liofilización como métodos de microencapsulación de pigmentos naturales

| Fuentes | Método de secado ^a | Agente encapsulante ^b | Concentración | Condiciones de encapsulación ^c | Eficiencia % | <i>L</i> [*] | <i>a</i> [*] | <i>b</i> [*] | Referencia | |
|---|---|--|--|---|--------------------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------|
| <i>Antocianinas</i> | | | | | | | | | | |
| Jugo de arándanos (<i>Vaccinium myrtillus</i>) | SD | GA | 15 % | w/v | T in = 185 °C; Tout = 105 °C | 69.8 | - | - | Zhang et al., 2020 | |
| | | GA-MDX (1:1) | 15 % | w/v | T in = 185 °C; Tout = 105 °C | 83.3 | - | - | | |
| Rosa japonesa (<i>Rosa rugosa</i>) | SD | GA-MDX (1:1) | 10:100 | w/v | T in = 170 °C; Tout = 80 °C | 69.83 | 77.57 | 11.7 | 5.86 | Yu y Lv, 2019 |
| | FD | GA-MDX (1:1) | 10:100 | w/v | T = - 52 °C; t = 48 h; P = 0.45 mbar | 72.15 | 66.83 | 17.4 | 1.04 | |
| Pulpa de morera (<i>Morus alba</i>) | FD | GA | 1:50, 1:60, 1:70, 1:80, 1:90, 1:100, 1:110 | w/w | - | - | - | - | Xu et al., 2019 | |
| Pulpa de mora andina (<i>Rubus glaucus</i> Benth) | SD | GA | 1:1 | w/w | T in = 120 °C; Tout = 70 °C | - | - | - | Villacrez et al., 2014 | |
| | | GA-MDX 20ED (1:1) | 1:1 | w/w | T in = 120 °C; Tout = 70 °C | - | - | - | | |
| Extracto de mora azul (<i>Vaccinium corymbosum</i>) | SD | GA-MDX (1:4) | 10 % | w/w | T in = 125 °C | 83.33 | ΔE (extracto) = 6.53 | | Tatar Turan et al., 2015 | |
| | SD (atomizador ultrasónico, 60 kHz, 1-15 W) | GA-MDX (1:4) | 10 % | w/w | T in = 125 °C | 87 | ΔE (extracto) = 5.49 | | | |
| | FD | GA-MDX (1:4) | 10 % | w/w | T = - 80 °C; t = 24 h; P = 0.1 mbar | 98 | ΔE (extracto) = 3.25 | | | |
| Extracto de bagazo de uva | FD | GA (solución, 30 % sólidos totales) | - | - | t = 72 h | 89.5 | 72.22 | 13.15 | 8.29 | Stoll et al., 2016 |
| | | GA-MDX (1:1, solución, 30 % sólidos totales) | - | - | | 89.61 | 73.43 | 16.39 | 6.17 | |
| Frambuesas negras (<i>Rubus occidentalis</i>) | FD | GA-gelatina (conservación) | - | - | - | - | 18.88-22.6 | 1.51-7.59 | 2.18-4.05 | Shaddel et al., 2018 |
| Extracto de piel de berenjena | SD (atomizador rotatorio) | GA | 10 % | - | T in = 140 °C | - | 33.34 | 9.48 | 73.32 | Sarabandi et al., 2019 |
| | | | | | T in = 170 °C | - | 34.61 | 9.15 | 73.41 | |
| | | GA-MDX (1:1) | 10 % | - | T in = 140 °C | - | 32.37 | 10.66 | 70.08 | |
| | | | | | T in = 170 °C | - | 34.39 | 10.06 | 70.85 | |
| Pulpa de palmito | SD | GA-almidón modificado-WPC o SPI | 1:1 | w/w | T in = 150 °C; Tout = 90 - 98 °C | 80.3-99.4 | - | - | - | Santana et al., 2016 |

Tabla I. Secado por atomización y liofilización como métodos de microencapsulación de pigmentos naturales (continuación)

| Fuentes | Método de secado ^a | Agente encapsulante ^b | Concentración | | Condiciones de encapsulación ^c | Eficiencia % | L* | a* | b* | Referencia |
|--|-------------------------------|---|---------------|-----|--|---|-------|-------|-------|-------------------------------|
| Maqui (<i>Aristotelia chilensis</i>) | FD | GA | 10 | w/v | T = -80 °C; t = 72 h; P = 25 mmHg | 24.2 | - | - | - | Romero-González et al., 2020 |
| | | | 20 | w/v | | 5.9 | - | - | - | |
| | | | 30 | w/v | | 20.1 | - | - | - | |
| | | GA-MDX | 10 | w/v | | 23.7 | - | - | - | |
| | | | 20 | w/v | | 6.2 | - | - | - | |
| | | | 30 | w/v | | 18.2 | - | - | - | |
| | | GA-inulina | 10 | w/v | | 27.2 | - | - | - | |
| | | | 20 | w/v | | 7.5 | - | - | - | |
| | | | 30 | w/v | | 30.3 | - | - | - | |
| | | GA-MDX-inulina | 10 | w/v | | 24.3 | - | - | - | |
| | | | 20 | w/v | | 6.7 | - | - | - | |
| | | | 30 | w/v | | 22.3 | - | - | - | |
| Jugo de tamarillo (<i>Solanum betaceum</i>) | SD (atomizador rotatorio) | GA | 20 % | w/w | T in = 150 °C | 83.16 antocianinas / 94.83 carotenoides | 64.66 | 20.23 | 6.23 | Ramakrishnan, et al., 2018) |
| Chokeberry (<i>Aronia melanocarpa</i>) liofilizado | SD | GA-MDX 18-20ED (3:37, solución, 40 % sólidos) | 1:3 | w/w | T in = 140 °C | 78.61 | 74.01 | 11.2 | 4.92 | Pieczykolan y Kurek, 2019 |
| | | GG-MDX 18-20ED (3:37, solución, 40 % sólidos) | 1:3 | w/w | T in = 140 °C | 91.98 | 74.4 | 9.04 | 4.43 | |
| Arroz negro (<i>Oryza sativa L.</i>) | SD | GA | 4:1 | w/w | T in = 150 °C | - | - | - | - | Papillo et al., 2018 |
| | | GA-MDX (1:1) | 4:1 | w/w | | - | - | - | - | |
| | FD | GA | 4:1 | w/w | T = -40 / -35 °C; t = 6 - 9 / 5 h; P = 1.11 mbar | - | - | - | - | |
| | | GA-MDX (1:1) | 4:1 | w/w | | - | - | - | - | |
| Jamaica (<i>Hibiscus sabdariffa</i>) | SD | GA-MDX (1:3) | - | - | T in = 150 °C; T out = 100 °C | - | - | - | - | Akhavan Mahdavi et al., 2016 |
| Xkijit (<i>Renalmia alpinia</i>) | SD | GA | 1:3 | w/w | T in = 150 °C; T out = 98 °C | - | 28.3 | 23.12 | -6.58 | Jimenez-Gonzalez et al., 2018 |
| | | GA-MDX (1:1) | 1:4 | w/w | T in = 150 °C; T out = 98 °C | - | 25.3 | 18.24 | -7.48 | |
| Jamaica | SD | GMez | 1 % | - | T in = 180 °C; T out = 104 °C | - | 39.2 | 32.04 | 9.11 | Ochoa-Velasco et al., 2017 |
| | | | 2 % | - | | - | 40 | 32.18 | 9.22 | |
| | | | 3 % | - | | - | 40.94 | 32.01 | 8.98 | |
| | | | 4 % | - | | - | 40.82 | 32.01 | 8.98 | |
| | | | 5 % | - | | - | 40.53 | 31.44 | 8.95 | |

Tabla I. Secado por atomización y liofilización como métodos de microencapsulación de pigmentos naturales (continuación)

| Fuentes | Método de secado ^a | Agente encapsulante ^b | Concentración | Condiciones de encapsulación ^c | Eficiencia % | <i>L</i> [*] | <i>a</i> [*] | <i>b</i> [*] | Referencia | |
|--|-------------------------------|--|---------------|---|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------|------------------------------|
| Mora azul | SD | GMez (solución, 17 %) | 67:33 | v/v | T in = 140 °C; T out = 81 °C | - | 38.27 | 32.88 | 3.06 | Jiménez-Aguilar et al., 2011 |
| | | | | | T in = 140 °C; T out = 80 °C | - | 35.8 | 33.33 | 3.4 | |
| | | | | | T in = 140 °C; T out = 80 °C | - | 35.87 | 33.46 | 4.15 | |
| | | | | | T in = 160 °C; T out = 95 °C | - | 39.48 | 34.46 | 3.67 | |
| | | | | | T in = 160 °C; T out = 95 °C | - | 37.83 | 33.24 | 4.88 | |
| | | | | | T in = 160 °C; T out = 92 °C | - | 36.21 | 33.53 | 5.89 | |
| Mora azul | FD | GX-CMC | - | - | T = -58 °C; t = 42 h; P = 0.001 mbar | - | 45.87 | 4.95 | 0.26 | Cai et al., 2019 |
| Morera | SD | GA | - | - | T in = 140 °C | - | - | - | - | Bernardes et al., 2019 |
| Cáscara de uva | SD | GA-polidextrosa (1:1) | 10 % | - | T in = 140 °C | - | 38.06 | 46.28 | -7.42 | Kuck y Noreña, 2016 |
| | | GA | 10 % | - | | - | 40.17 | 46.29 | -9.57 | |
| | FD | GA-polidextrosa (1:1) | 10 % | - | T = -57 °C; t = 48 h; P = 20 µmHg | - | 22.46 | 27.11 | -0.44 | |
| | | GA | 10 % | - | | - | 22.28 | 28.36 | -2.44 | |
| | SD | GG parcialmente hidrolizada - polidextrosa (1:1) | 10 % | - | T in = 140 °C | - | 37.89 | 46.03 | -5.91 | |
| | | GG parcialmente hidrolizada | 10 % | - | | - | 40.33 | 46.22 | -6.33 | |
| | FD | GG parcialmente hidrolizada - polidextrosa (1:1) | 10 % | - | T = -57 °C; t = 48 h; P = 20 µmHg | - | 20.63 | 25.36 | -1.02 | |
| | | GG parcialmente hidrolizada | 10 % | - | | - | 22.6 | 29.08 | -0.46 | |
| <i>Betalainas</i> | | | | | | | | | | |
| Jugo de betabel (<i>Beta vulgaris</i>) | SD | GA (solución, 30 %) | 1:3 | - | T in = 180 °C; T out = 85 °C | - | 6.56 | 4.86 | 0.18 | Pitalua et al., 2010 |
| Betabel | SD | GA-MDX 20ED (1:19) | 20 % | - | T in = 90 - 102 °C | - | 86.3 | 12.1 | -2.01 | Ravichandran et al., 2014 |
| | | GX-MDX 20ED (1:19) | 20 % | - | | - | 86.1 | 11.4 | -1.57 | |

Tabla I. Secado por atomización y liofilización como métodos de microencapsulación de pigmentos naturales (continuación)

| Fuentes | Método de secado ^a | Agente encapsulante ^b | Concentración | Condiciones de encapsulación ^c | Eficiencia % | L* | a* | b* | Referencia | |
|--|------------------------------------|--|------------------------|---|---------------------------------------|-------|-------|-------|---------------------------|----------------------------|
| Betabel | FD | GA-MDX 20ED (1:19) | 20 % | T = °C; t = 72 h | - | 75 | 16.2 | 2.69 | Ravichandran et al., 2014 | |
| | | GX-MDX 20ED (1:19) | 20 % | | - | 71.3 | 21.2 | -1.11 | | |
| | | GX-MDX 20ED (0.5:19.5) | 20 % | | - | 75.4 | 19 | -1.09 | | |
| | | GG-MDX 20ED (1:19) | 20 % | | - | 72 | 21 | -0.4 | | |
| | | GG-MDX 20ED (0.5:19.5) | 20 % | | - | 68.5 | 21.6 | -1.28 | | |
| | FD | GA (solución, 15 %) | 15 % | T = - 57 °C; t = 48 h; P = 0.017 mbar | - | 64.64 | 35.27 | -2.91 | Chranioti et al., 2015 | |
| | | GA-almidón modificado (1:1, solución 15 %) | relación 0.33 | | - | 60.48 | 34.13 | -3.57 | | |
| | SD | GX-MDX (solución, 0.5:99.5) | 30 % | w/w | T in = 150 °C; T out = 90 °C | - | - | - | Antigo et al., 2017 | |
| | FD | GX-MDX (solución, 0.5:99.5) | 30 % | w/w | T = - 36 °C; t = 48 h; P = 1.09 Pa | - | - | - | | |
| | SD (atomizador de disco rotatorio) | GA | 25 % (sólidos totales) | w/w | T in = 160 °C | - | - | - | Janiszewska, 2014 | |
| | | GA-MDX (1:1) | 25 % (sólidos totales) | w/w | | - | - | - | | |
| <i>Carotenoides</i> | | | | | | | | | | |
| Jugo de cereza brasileña (<i>Eugenia uniflora</i> L.) | FD | GX | 1:1 | - | - | 91.52 | - | - | Rutz et al., 2013 | |
| | | GT | 1:1 | - | - | 92.67 | - | - | | |
| | | GX-GT (1:1, soluciones al 5 %) | 1:1 | - | - | 74.06 | - | - | | |
| Azafrán (<i>Crocus sativus</i>) | FD | GA (solución, 15 %) | 15 % | - | T = - 57 °C; t = 48 h; P = 0.017 mbar | - | 89.79 | -2.49 | 41.71 | Chranioti et al., 2015 |
| | | GA-almidón modificado (1:1, solución 15 %) | relación 0.33 | w/w | | - | 90.98 | -6.6 | 44.71 | |
| Luteína | SD | GA (solución, 11 %) | - | - | T in = 185 °C; T out = 100 °C | 91.94 | - | - | - | Álvarez-Henao et al., 2018 |
| | | GA-MDX (1:1, solución 11 %) | - | - | | 38.82 | - | - | - | |
| | SD | GA-almidón modificado (1:1, solución 11 %) | - | - | | 36.77 | - | - | - | |
| | | GA-MDX-almidón modificado (1:1:1, solución 11 %) | - | - | | 65.72 | - | - | - | |

Tabla I. Secado por atomización y liofilización como métodos de microencapsulación de pigmentos naturales (continuación)

| Fuentes | Método de secado ^a | Agente encapsulante ^b | Concentración | | Condiciones de encapsulación ^c | Eficiencia % | L* | a* | b* | Referencia |
|--|-------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|-----|---|--------------|-------|-------|-------|------------------------------|
| Algas | SD | GA-MDX (4:6) | 20 % | w/w | T in = 110 °C; T out = 50 °C | - | - | - | - | Bonilla-Ahumada et al., 2018 |
| | | | | | T in = 130 °C; T out = 55 °C | - | - | - | - | |
| | | | | | T in = 150 °C; T out = 60 °C | - | - | - | - | |
| Astaxantinas de <i>Haematococcus pluvialis</i> | SD | GA | 10 % | w/w | T in = 120 °C; T out = 70 °C | - | 53 | 32 | 35.7 | Bustos-Garza et al., 2013 |
| | | GA-inulina (1:1) | 10 % | w/w | | - | 52.7 | 35.8 | 34.3 | |
| | | GA-MDX (1:1) | 10 % | w/w | | - | 57.9 | 17.9 | 49.7 | |
| | | GA-WPC (1:1) | 10 % | w/w | | - | 60.5 | 28.4 | 24.8 | |
| | | GA-inulina (0.25:0.75) | 10 % | w/w | | - | 33.1 | 29.9 | 27.3 | |
| | | GA-MDX (0.25:0.75) | 10 % | w/w | | - | 54.2 | 17.9 | 32.4 | |
| | | GA-WPC (0.25:0.75) | 10 % | w/w | | - | 54.2 | 35.1 | 36.8 | |
| Achiote (bixina) | SD | GA-MDX (1:1) | 1:4 | v/v | T in = 180 °C; T out = 130 °C | 75.69 | - | - | - | De Marco et al., 2013 |
| Maracuyá (<i>Passiflora edulis</i>) | SD | GA-GMeZ-MDX 10ED (17:17:66 %) | 30 % sólidos totales | - | T in = 135 °C; T out = 80 °C | - | - | - | - | Carrillo-Navas et al., 2011 |
| | | GA-GMeZ-MDX 10ED (17:66:17 %) | 30 % sólidos totales | - | | - | - | - | - | |
| Cantaxantina de <i>Dietzia natronolimnaea</i> | SD | GA (solución, 10 %) | 1:4 | - | T in = 170 °C; T out = 90 °C | 86.9 | - | - | - | Hojjati et al., 2014 |
| Fucoxantina de alga (<i>Eisenia bicyclis</i>) | FD | GA-gelatina de pescado (1:1) | 1.50 % | - | T = 10 °C; t = 30 h; P = 37 Pa | - | - | - | - | Quan et al., 2013 |
| Paprika | SD | GA (0.03 %) | 1:4 | - | T in = 160 °C; T out = 100 °C | - | - | - | - | Rascón et al., 2011 |
| | | | | - | T in = 180 °C; T out = 100 °C | - | - | - | - | |
| | | | | - | T in = 200 °C; T out = 100 °C | - | - | - | - | |
| β-caroteno | FD | GG | 0.05 % 0.10 % 0.25 % 0.50 % | w/v | P = 0.0098 mbar | 57.05 | - | - | - | Thakur et al., 2017 |
| | | | | w/v | | 62.6 | - | - | - | |
| | | | | w/v | | 63.16 | - | - | - | |
| | | | | w/v | | 65.95 | - | - | - | |
| Sea buckthorn (<i>Hippophae rhamnoides L.</i>) | FD | GA (solución 1 %) | 1:1 | | T = -42 °C; t = 48 h; P = 0.1 mbar | 56.16 | 81.03 | 10.74 | 75.98 | Ursache et al., 2018 |

^a SD, secado por atomización (spray drying); FD, liofilización (freeze drying); ^b GA, goma arábiga; GMeZ, goma de mezquite; GG, goma guar; GX, goma xantana; GT, goma tara; MDX, maltodextrina; WPC, concentrado de proteína de suero de leche; SPI, aislado de proteína de soya; CMC, carboximetilcelulosa; ^c T, temperatura de liofilización; T in, temperatura de entrada en el secado por atomización; T out, temperatura de salida en el secado por atomización; t, tiempo en horas; P, presión.

No obstante, en algunos casos la combinación de más de un agente encapsulante es necesaria para obtener las propiedades de encapsulación esperadas del producto final. La mezcla GA-MDX, ha sido evaluada por diferentes autores, demostrando que la combinación tiene un efecto significativo en la retención de pigmentos, incrementando en un 13.5 % el contenido de antocianas de jugo de arándano microencapsulado mediante secado por atomización, frente a los resultados obtenidos al utilizar GA como único agente encapsulante (Zhang *et al.*, 2020). Por el contrario, Stoll, Costa, Jablonski, Flôres y de Oliveira Rios (2016), así como Romero-González, Shun Ah-Hen, Lemus-Mondaca y Muñoz-Fariña (2020) no encontraron diferencias entre el uso de GA y GA-MDX en la encapsulación de antocianinas, usando liofilización, para el bagazo de uva y de frutos de maqui (*Aristotelia chilensis* [Mol.] Stuntz), respectivamente. En el caso de los carotenoides, Álvarez-Henao *et al.* (2018) encapsularon luteína mediante secado por atomización, encontrando que la GA presentó los valores más altos en la retención del pigmento; 53 % superior comparado con el que usó de GA-MDX, 55 % más que usando GA-almidón modificado y 26 % más que con una mezcla ternaria de GA-MDX-almidón modificado.

Otras mezclas que han sido utilizadas son GA-inulina, GA-MDX-inulina (Romero-González *et al.*, 2020), GA-gelatina (Shaddel *et al.*, 2018) y GA-polidextrosa (Kuck y Noreña, 2016), para an-

tocianinas. Santana *et al.* (2016) usaron GA-almidón modificado-WPC (concentrado de proteína de suero de leche) o SPI (aislado de proteína de soya), para la encapsulación de antocianinas, usando un diseño de mezclas para la optimización de diferentes parámetros físicos y antioxidantes, obteniendo mejores resultados en la retención del pigmento al utilizar las mezclas ternarias. De igual forma, se ha utilizado GA-almidón modificado para betalaínas (Chranioti, *et al.*, 2015); GA-almidón modificado para luteína (Álvarez- Henao *et al.*, 2018), GA-inulina y GA-WPC para astaxantinas (Bustos-Garza *et al.*, 2013), y GA-gelatina de pescado para fucoxantinas (Quan *et al.*, 2013).

Se ha visto también que el método de encapsulación influye en la retención de los pigmentos. Antocianinas de rosa japonesa (*Rosa rugosa*) encapsuladas con GA-MDX (1:1), secadas por liofilización, presentaron 2.32 % más antocianinas en comparación con las secadas por atomización; lo cual se vio reflejado en el color de los polvos, incrementando los valores de a^* (relacionados con la presencia de antocianinas) (Yu y Lv, 2019). En otro estudio similar, Tatar Turan, Cengiz y Kahyaoglu (2015) realizaron el secado de antocianinas de mora azul (GA-MDX, 1:4), obteniendo aproximadamente 18 % más antocianinas microencapsuladas con liofilización que con secado por atomización y un valor de ΔE menor (con respecto al extracto sin deshidratar) de todos los tratamientos evaluados.

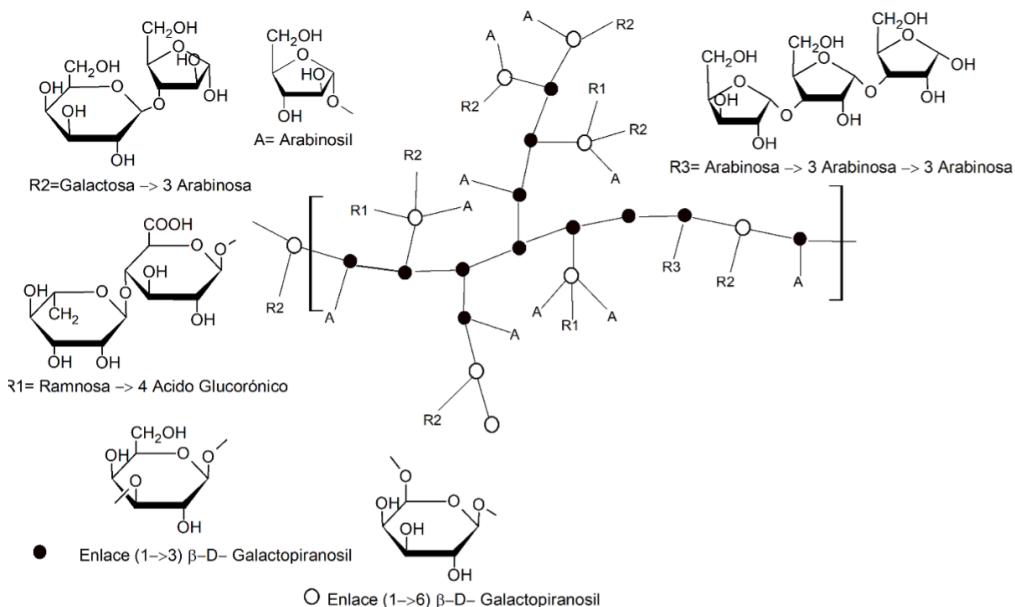


Figura 2.

Estructura molecular de goma arábica.

Tabla II. Resumen de las propiedades de algunas gomas usadas en la encapsulación de pigmentos

| Nombre | Carga | Fuente | Propiedades | Unidades constituyentes | PM (g/mol) |
|----------|-----------|----------------------|--|--|-------------------|
| Arábiga | Aniónico | Exudado de plantas | Tetra-heteroglicano; emulgente, estabilizante, gelificante, formador de película y encapsulante | β -D-ácido glucopiranurónico, α -L-rhamnopiranosa, β -D-galactopiranosa, β -D-4Me-ácido glucopiranurónico, α -L-arabinosefuranosa, α -D-galactopiranosa | 250,000-820,000 |
| Mezquite | Aniónico | Exudado de plantas | Sal neutra de un polisacárido ramificado ácido complejo; puede sustituir a la goma arábiga, emulgente, espesante, agente encapsulante para emulsiones, aromas, colores, agente espumante, capaz de formar película | Galactopiranosilo y manopiranosilo en (proporción 2:1) cadena principal enlazada con unidades de arabinosilo, rhamnopiranosilo, glucuronosilo y metilglucuronosilo | 2,120,864 |
| Xantana | No iónico | Exudado de bacterias | Tri-heteroglicano; útil en la suspensión de partículas, emulgente, estabilizante, formador de película | β -D-glucosa, β -D-manosa, α -D-manosa ácido D-glucurónico | 300,000-8,000,000 |
| Guar | No iónico | Semillas | Di-heteroglicano; espesante, estabilizante, útil en la suspensión de partículas | β -D-manopiranosa, α -D-galactopiranosa | 200,000-8,000,000 |

Adaptada de Ahmad *et al.*, 2019; Hamdani *et al.*, 2019; López-Franco *et al.*, 2009; Taheri y Jafari, 2019.

2.2. Goma de mezquite

Al igual que la goma arábiga, la goma de mezquite (GMez) es un exudado que proviene del árbol de mezquite, originario de México (Vernon-Carter *et al.*, 2000). Su uso en alimentos es bastante común, pues es altamente soluble en agua; incluso se le ha considerado un sustituto de la goma arábiga. Se considera de menor calidad debido a que, en solución acuosa, toma una coloración café (López-Franco *et al.*, 2009; Mishra, 2015).

La GMez es la sal neutra de un polisacárido ácido complejo ramificado o un heteropolielectrolito aniónico ramificado (García-Márquez *et al.*, 2015; López-Franco *et al.*, 2009). La estructura molecular de la GMez (figura 3), consta de una cadena principal formada de residuos β -D-galactosa, unidos por los enlaces (1→3). Sus ramificaciones unidas por los enlaces 1→6 presentan L-arabinosa, L-ramnosa, β -D-glucuronato y 4-O-metil- β -D-glucuronato (azúcar simple u oligosacárido) (Bosquez-Molina *et al.*, 2003). Contiene una pequeña porción de proteína (entre 0.7

y 6%) unida de manera covalente a la cadena principal, la cual juega un papel importante durante la emulsión (García-Márquez *et al.*, 2015; Vernon-Carter *et al.*, 2000).

En la tabla II se presentan algunas propiedades de la GMez. Se ha utilizado en la encapsulación de sabores, como agente espumante, estabilizante y como agente ligante (Vernon-Carter *et al.*, 2000). El incremento en el uso de esta goma representaría una oportunidad para las comunidades productoras de este aditivo (Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2018).

Muy pocos trabajos han reportado el uso de la GMez para la encapsulación de pigmentos (tabla I). Uno de ellos es el realizado por Jiménez-Aguilar *et al.* (2011) para la encapsulación de antocianinas de mora azul (*Vaccinium corymbosum*) mediante secado por atomización. En este trabajo, la temperatura fue el factor principal que afectó la degradación de los pigmentos. Por otro lado, Ochoa-Velasco *et al.* (2017) utilizaron antocianinas de flor de Jamaica y probaron diferentes concentraciones de GMez (1, 2,

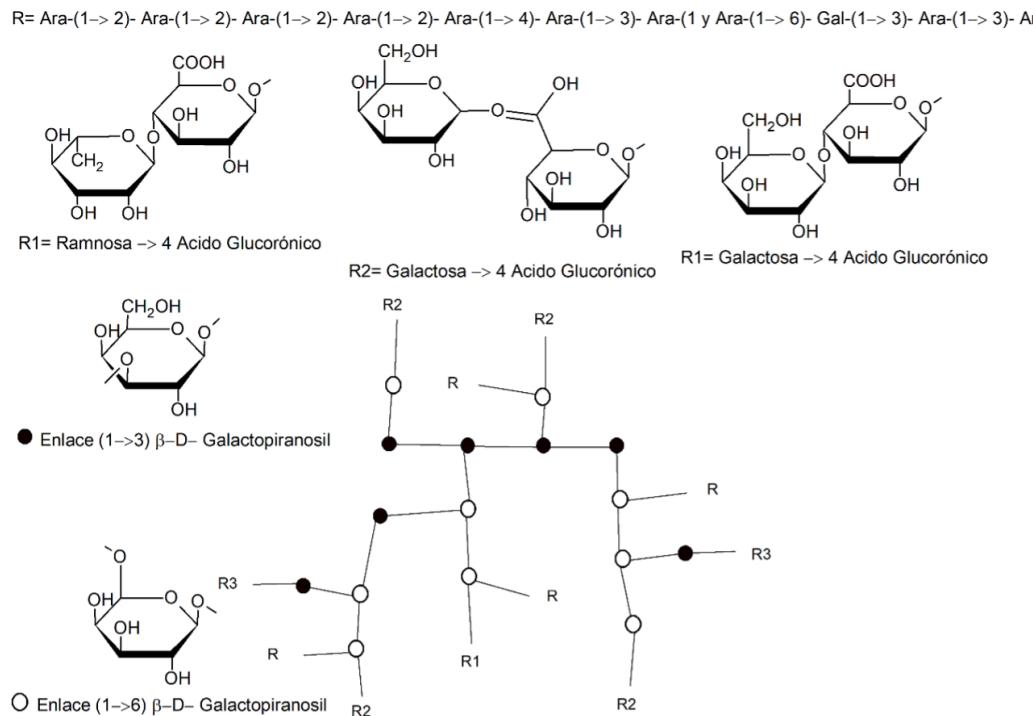


Figura 3.

Estructura molecular de goma de mezquite.

3, 4, 5 %), las cuales fueron deshidratadas por atomización. Los resultados obtenidos muestran que incrementar la cantidad de GMEZ en la mezcla de alimentación no tiene efecto en la humedad del producto final, pero incrementa el rendimiento. No obstante, los autores argumentan que la adición excesiva de goma al extracto genera polvos con baja calidad nutrimental. Además, el incremento en la concentración de GMEZ afecta el color del producto, disminuyendo los valores del parámetro de color a^* . No obstante, gracias al uso de la GMEZ, el contenido de antocianinas y el color pueden mantenerse, con ligeras variaciones, hasta por un año en condiciones de refrigeración (4 °C).

Al igual que la GA, el uso de la GMez resulta en partículas con rugosidades sobre la superficie de la esfera (Ochoa-Velasco *et al.*, 2017), esto puede deberse a las similitudes entre ambas gomas (López-Franco *et al.*, 2009; Vernon-Carter *et al.*, 2000), ocasionando la formación de una costra y el secado desigual de la partícula (Zhang *et al.*, 2020).

La GMEZ, en combinación con GA y MDX, ha sido utilizada para la encapsulación de jugo de maracuyá. Los resultados obtenidos por Carrillo-Navas *et al.* (2011) demostraron que la combinación de los tres agentes encapsulantes genera polvos altamente hidroscópicos por el gran número de grupos hidrofílicos presentes en los tres agentes. De las dos formulaciones probadas (mayor concentración de GMEZ o mayor concentración de MDX), los polvos donde la GMEZ se encontraba en mayor proporción presentaron mejores características de rehidratación, retención de vitamina C y color (determinación visual) en el producto reconstituido.

La encapsulación de aceite de cardamomo (Beristain *et al.*, 2001) y aceite de naranja (Beristain *et al.*, 2002; Beristain y Vernon-Carter, 1994) ha demostrado que compuestos liposolubles como los carotenoides pueden ser estabilizados utilizando GMEZ y secado por atomización. Hasta el momento no se encontraron reportes del uso de la GMEZ en la encapsulación de betalaínas, o su uso en el secado por liofilización de cualquiera de los pigmentos.

2.3. Goma xantana

La goma xantana (GX) es un polisacárido soluble en agua obtenido de la fermentación por *Xanthomonas campestris*. Se utiliza glucosa o sacarosa como fuente de carbono; una alternativa para su obtención es el uso de residuos agroindustriales (Palaniraj y Jayaraman, 2011).

La estructura molecular de la GX (figura 4) consta de una cadena primaria compuesta de β -D-glucosa unida por los carbonos 1→4 y cadenas laterales con ácido glucurónico entre dos moléculas de manosa como residuo (Habibi y Khosravi-Darani, 2017). Algunas de sus características funcionales se encuentran en la tabla II. La GX es ampliamente usada en alimentos; como espesante (altamente viscosa a bajas concentraciones) presenta un comportamiento pseudoplástico en soluciones acuosas en un amplio intervalo de pH (2-12) y es estable a altas temperaturas (Kumar *et al.*, 2018). Tiene la capacidad de estabilizar emulsiones evitando la floculación (Fu *et al.*, 2019). Asimismo, la GX puede generar estructuras en forma de red mediante el entrecruzamiento intramolecular y contracción de sus mismas cadenas laterales (Kumar *et al.*, 2018).

Debido a esas mismas características, se ha utilizado en la encapsulación de pigmentos (antocianinas, betalaínas y carotenoides) (tabla I). Sin embargo, este agente encapsulante debe usarse en concentraciones muy bajas (Antigo *et al.*, 2017; Ravichandran *et al.*, 2014; Rutz *et al.*, 2013).

Para la encapsulación de antocianinas de mora azul mediante liofilización, Cai *et al.* (2019) probaron distintas concentraciones de carboximetilcelulosa y GX (30 : 1, 60 : 1, 90 : 1, 120 : 1, 150 : 1, w/w). Los resultados de ese trabajo demostraron que la eficiencia de encapsulación no depende de la relación entre los agentes encapsulantes, ya que todos se encontraron entre 96 y 97 %. Los autores destacan que la combinación de ambos agentes de encapsulación tiene un efecto sinérgico en la absorción de antocianinas y genera la formación de una película debido a las propiedades fisicoquímicas de ambas moléculas. Los autores también indican que las cargas negativas de la carboximetilcelulosa se repelen unas con otras, adsorbiendo agua y, dada la naturaleza hidrofílica de la GX, se une a la carboximetilcelulosa formando una red o película que protege a las antocianinas de la degradación durante el secado. Este efecto se confirmó mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).

Por otro lado, Ravichandran *et al.* (2014) y Antigo *et al.* (2017) reportan investigaciones enfocadas en la encapsulación de betalaínas con GX-MDX en betabel, comparando el efecto del método de encapsulación (secado por atomización contra liofilización). Los resultados obtenidos por Ravichandran *et al.* (2014) sugieren que el método ideal para la encapsulación es la liofilización, ya que se retuvo 1.3 veces más betalaínas que con el secado por atomización. El color de los polvos obtenidos mediante secado por atomización resultó más claro (valores de L^* más altos). Los valores de a^* disminuyeron cerca de la mitad, en comparación con los obtenidos por liofilización; haciendo evidente el efecto de la temperatura como un factor determinante en la obtención de los pigmentos microencapsulados.

2.4. Goma guar

La goma guar (GG) proviene del endospermo de la semilla de *Cyamopsis tetragonolobus*. Es un galactomanano cuya ausencia de ácido urónico la distingue del resto de las gomas provenientes de semillas (Cano-Barrita y León-Martínez, 2016; George *et al.*, 2019).

La estructura molecular (figura 5) consiste en una cadena principal constituida por unidades de α -D-galactosa unidas por los carbonos 1→4. La estructura tiene múltiples ramificaciones al azar de manosa/galactosa, las cuales se encuentran en proporción 2 : 1 (Hasan y Abdel-Raouf, 2018). De las gomas presentadas en este trabajo, la GG tiene el peso molecular más alto (tabla II).

La GG presenta propiedades similares a la GX, sin embargo, se caracteriza por su capacidad de absorber agua. Cuando la GG interactúa con el agua, la galactosa en las ramificaciones de la molécula unida a la cadena principal de manosa forma entrelazamientos intermoleculares, lo cual puede incrementar la viscosidad de la solución, incluso a bajas concentraciones (1 % w/v, solución acuosa, 10,000 cP) (Sharma *et al.*, 2018).

La microencapsulación por el método de liofilización de pigmentos con GG es más conveniente que el secado por atomización. Para este último es necesario llevar a cabo la hidrólisis de la goma, debido a que las propiedades de rehidratación y de entrecruzamiento incrementan la viscosidad, lo que impide el paso a través de la tobera (Kuck y Noreña, 2016; Ravichandran *et al.*, 2014). De acuerdo con Kuck y Noreña (2016), la encap-

sulación de antocianinas usando GG parcialmente hidrolizada y secado por atomización resultó en los valores más altos en la retención de antocianinas (combinada con polidextrosa o sola), con valores similares a los presentes al extracto sin deshidratar. Por el contrario, la liofilización fue capaz de retener parte de las antocianinas, pero los valores fueron menores a los obtenidos mediante secado por atomización, por lo que la GG

hidrolizada no protege a las antocianinas durante la liofilización. En lo que respecta a la retención del color, se registró el mismo comportamiento que en el contenido de antocianinas, siendo que el secado por atomización presentó los valores de a^* más altos, alrededor de 41 % más retención del color rojo en comparación con la liofilización.

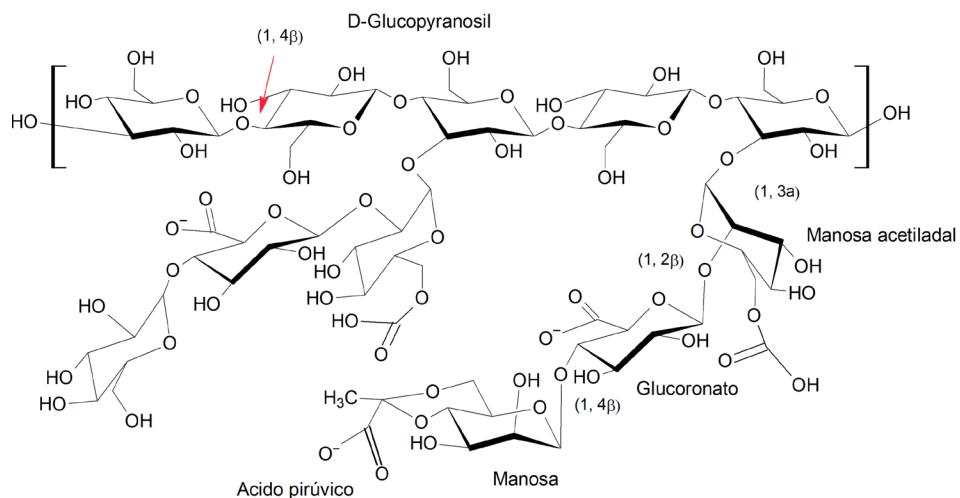


Figura 4.

Estructura molecular de la goma xantana.

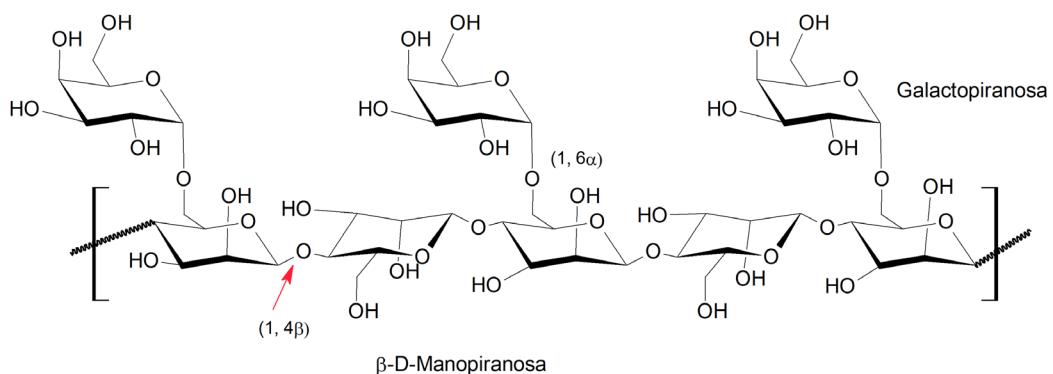


Figura 5.

Estructura molecular de la goma guar.

3. Estabilidad de los pigmentos

Durante la preparación de alimentos, los ingredientes se someten a diferentes procesos. Estos pueden involucrar cambios en la temperatura; incrementándose debido a la pasteurización, escaldado, esterilización, o bien disminuyendo debido a las condiciones de almacenamiento en refrigeración o congelación, de igual forma pueden presentarse cambios químicos (pH, oxígeno) (Başlar *et al.*, 2014; Ling *et al.*, 2015).

3.1. Efecto de las condiciones de almacenamiento

Algunos autores hacen uso de herramientas estadísticas y probabilísticas para observar el comportamiento de los materiales de encapsulación y el compuesto activo bajo diferentes condiciones de almacenamiento (Yu y Lv, 2019). La cinética de reacción de la mayoría de los procesos estudiados en la degradación de pigmentos microencapsulados corresponde a un comportamiento de primer orden $C_t = C_0 e^{-kt}$, donde C_0 es la concentración inicial; C_t , la concentración al tiempo (t); y k es la constante de degradación, la cual se utiliza para el cálculo de la vida media ($t_{1/2} = \log(2)/k$). En la tabla III se muestra un resumen de los datos cinéticos de degradación de antocianinas, betalaínas y carotenoides microencapsulados bajo diferentes condiciones de almacenamiento. En los siguientes apartados se explican a detalle los efectos de diversos factores durante el almacenamiento de los pigmentos microencapsulados y la degradación de algunas de sus propiedades.

3.1.1. Efecto de la temperatura

De forma general, los autores que han evaluado el efecto de la temperatura sobre la constante de degradación observaron que, al incrementar la temperatura durante el almacenamiento, también lo hace k , lo cual se refleja en la pérdida de pigmentos y una $t_{1/2}$ más corta (Akhavan Mahdavi *et al.*, 2016; Bustos-Garza

et al., 2013; Hojjati *et al.*, 2014; Jiménez-Aguilar *et al.*, 2011; Yu y Lv, 2019; Zhang *et al.*, 2020). Por el contrario, temperaturas de refrigeración disminuyen el valor de k , ya que limitan la movilidad de las moléculas de agua que pueden estar presentes en el producto (pigmentos microencapsulados), además, temperaturas por debajo de la T_g , hacen menos probable que sucedan las reacciones. No obstante, la reducción de la temperatura por debajo de la T_g no es el único parámetro del cual depende la estabilidad de los pigmentos microencapsulados (Pitalua *et al.*, 2010).

3.1.2. Influencia del agente encapsulante

Chranioti *et al.* (2015) observaron la influencia de diferentes agentes de encapsulación (GA y GA-almidón modificado) a condiciones fijas de almacenamiento ($T = 40^\circ\text{C}$, $HR = 20\%$ y ausencia de luz) sobre la degradación de betalaínas y carotenoides. Ellos reportan que el uso exclusivo de MDX protege mejora ambos pigmentos en comparación con GA y GA-almidón modificado. También indican que, al agregar GA a la mezcla, incrementaba la estabilidad en comparación con almidón modificado y quitosano. En otro estudio, Zhang *et al.* (2020) evaluaron GA y GA-MDX a las mismas condiciones de almacenamiento ($T = 40^\circ\text{C}$, $HR = 40\%$, sin luz); observaron que la adición de MDX incrementó el valor de k aproximadamente dos veces más que solo GA, lo cual disminuye el valor de $t_{1/2}$ de almacenamiento, de 495 a 25 días. Lo anterior puede estar relacionado con la compatibilidad del compuesto activo con el agente encapsulante y la formación de moléculas más estables (Jimenez-Gonzalez *et al.*, 2018; Moser *et al.*, 2017).

3.1.3. Influencia de la humedad relativa

Rascón, Beristain, García y Salgado (2011) evaluaron el efecto de la humedad relativa (HR) en pigmentos de paprika microencapsulados con GA mediante secado por atomización,

mientras que Pitalua *et al.* (2010) hicieron lo propio en betalaínas de betabel y GA. Ambos estudios concluyen que las mejores condiciones de almacenamiento son por debajo del 52 % de humedad relativa (HR), ya que valores más altos provocan un colapso en la estructura de la cápsula y degradación de los compuestos encapsulados (Pitalua *et al.*, 2010). Además, por encima del 70 % de HR se produce absorción de agua y cambios de estado físico (Rascón *et al.*, 2011); si bien, los autores reportan que este cambio de estado generó a una especie de masa que actuó como una barrera protectora contra el oxígeno y mantuvo los pigmentos durante más tiempo, el cambio de estado dificulta su adición cuando se utiliza como colorante en alimentos.

3.1.4. Influencia por exposición a la luz

El efecto de la luz es otro de los parámetros que más se ha estudiado. Jiménez-Aguilar *et al.* (2011), Rutz *et al.* (2013), Hojjati *et al.* (2014) y De Marco *et al.* (2013) observaron antocianinas de mora azul (*Vaccinium corymbosum*) encapsuladas con Gmez, carotenoides de jugo de cereza brasileña (*Eugenia uniflora L.*) encapsulados con GX, cantaxantinas de *Dietzia natronolimnaea* encapsuladas con GA, y bixina de achiote (*Bixa orellana*) encapsulada con GA-MDX, respectivamente. En todos los casos se concluyó que se degradaban a mayor velocidad (mayor valor de k , menor valor de $t_{1/2}$) por la exposición de la luz durante el almacenamiento. En el caso de las antocianinas encapsuladas, Jiménez-Aguilar *et al.* (2011) reportaron una reducción de 717 a 70 días en los valores de vida media ($t_{1/2}$) por la exposición de los microencapsulados a la luz (3000 lx / 25 °C). Mientras que De Marco *et al.* (2013) agregaron los pigmentos de bixina encapsulados a una solución acuosa, almacenada por 450 horas, al exponerlos a luz fluorescente (15 W / 25 °C), observaron una disminución de 231 a 44 días en el $t_{1/2}$.

3.1.5. Influencia de la morfología e interacción con el oxígeno

Como se mencionó previamente, la estructura de la microcápsula puede dictar la estabilidad de los pigmentos debido a las rugosidades, tamaño de partícula, grietas, entre otros. Al incrementar el área superficial, los compuestos activos pueden estar más expuestos a la interacción con el oxígeno (Zhang *et al.*, 2020), dando como resultado una degradación de los pigmentos. Este fenómeno ha sido reportado por Haas *et al.* (2019), quienes encapsularon concentrado de zanahoria mediante secado por atomización y liofilización, obteniendo diferentes tamaños de partícula (área superficial). Los pigmentos encapsulados mediante secado por atomización con mayor área superficial fueron más estables después de 91 días de almacenamiento, con aproximadamente un 20 % más carotenoides al finalizar el experimento. Por otro lado, el polvo obtenido mediante liofilización en dos morfologías (polvo fino, y polvo más grande y amorfó), las partículas más grandes retuvieron cerca de un 10 % más carotenoides que el polvo fino.

Además, el método de encapsulación afecta a la retención, ya que las partículas más uniformes, como las obtenidas mediante secado por atomización, protegen mejor a los pigmentos que las obtenidas por liofilización (Haas *et al.*, 2019); pues la mollienda del producto puede ser manual, generando partículas grandes e irregulares. Asimismo, el contenido de humedad en la microcápsula, el espesor de la pared, la porosidad, higroscopidad, entre otros, estarán en función del método de encapsulación y pueden ser factores importantes en la degradación de los pigmentos debido a la interacción con el oxígeno.

3.1.6. Efecto del pH

Debido a que la adición de los pigmentos se hace en matrices de diferente composición (lácteos, cárnicos, jugos, dul-

ces, entre otros), los valores de pH son diferentes. La evaluación de la estabilidad bajo diferentes valores de pH ha sido estudiada por Bustos-Garza *et al.* (2013), quienes observaron que la estabilidad depende del agente encapsulante en microencapsulados de astaxantina con GA, GA-inulina, GA-MDX y GA-WPC, adicionados a soluciones con valores de pH entre 3 y 7, almacenados durante 96 horas. Los microencapsulados de GA-WPC (1 : 1) y GA-inulina (1 : 3) fueron más estables

en soluciones con pH 6. Mientras que betalaínas de betabel encapsuladas con GX no mostraron dependencia al pH, pero sí al método de encapsulación. Los polvos obtenidos mediante secado por atomización y adicionados a una solución con pH 6 fueron menos estables que los obtenidos por liofilización, con una degradación al final del periodo de almacenamiento (7 días) del 44.9 % y 19.6 %, respectivamente (Antigo *et al.*, 2017).

Tabla III. Cinéticas de degradación de los pigmentos microencapsulados

| Fuente | Goma ^a | Método de secado ^b | Condiciones de almacenamiento ^c | $k \times 10^3$ (días ⁻¹) | $t_{\frac{1}{2}}$ (días) | Referencias |
|---|-------------------|-------------------------------|---|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|
| Jugo de arándanos (<i>Vaccinium corymbosum</i>) | GA | SD | T(°C) = 4; O ₂ = libre; Luz = no; RH % = 40 | - | - | Zhang <i>et al.</i> , 2020 |
| | | | T(°C) = 25; O ₂ = libre; Luz = no; RH % = 40 | - | - | |
| | | | T(°C) = 45; O ₂ = libre; Luz = no; RH % = 40 | 1.4 | 495 | |
| | GA-MDX (1:1) | SD | T(°C) = 4; O ₂ = libre; Luz = no; RH % = 40 | - | - | |
| | | | T(°C) = 25; O ₂ = libre; Luz = no; RH % = 40 | - | - | |
| | | | T(°C) = 45; O ₂ = libre; Luz = no; RH % = 40 | 2.77 | 25 | |
| Rosa japonesa (<i>Rosa rugosa</i>) | GA-MDX (1:1) | SD | T(°C) = 70 | 2088 | 0.33 | Yu y Lv, 2019 |
| | | | T(°C) = 80 | 3283 | 0.21 | |
| | | | T(°C) = 90 | 5860 | 0.12 | |
| | GA-MDX (1:1) | FD | T(°C) = 70 | 1713 | 0.4 | |
| | | | T(°C) = 80 | 2491 | 0.28 | |
| | | | T(°C) = 90 | 3974 | 0.17 | |
| Jamaica (<i>Hibiscus sabdariffa</i>) | GA-MDX (1:3) | SD | T(°C) = 4; Luz = no | 3.3 | 213.5 | Akhavan Mahdavi <i>et al.</i> , 2016 |
| | | | T(°C) = 25; Luz = no | 4.6 | 153.11 | |
| | | | T(°C) = 35; Luz = no | 7.5 | 93.94 | |
| | | | T(°C) = 42; Luz = no | 11.3 | 62.22 | |
| Mora azul (<i>Vaccinium myrtillus</i>) | Gmez | SD | T(°C) = 4; Luz = no | 0.1295 | 259 | Jiménez-Aguilar <i>et al.</i> , 2011 |
| | | | T(°C) = 25; Luz = sí | 0.4767 | 70 | |
| | | | T(°C) = 25; Luz = no | 0.2905 | 717 | |
| Jugo de betabel | GA (30 %) | SD | T(°C) = 30; RH % = 11 | - | - | Pitalua <i>et al.</i> , 2010 |
| | | | T(°C) = 30; RH % = 32.6 | - | - | |
| | | | T(°C) = 30; RH % = 52.1 | - | - | |
| | | | T(°C) = 30; RH % = 74.8 | - | - | |
| | | | T(°C) = 30; RH % = 89.8 | - | - | |

Tabla III. Cinéticas de degradación de los pigmentos microencapsulados (continuación)

| Fuente | Goma ^a | Método de secado ^b | Condiciones de almacenamiento ^c | $k \times 10^3$ (días $^{-1}$) | $t_{1/2}$ (días) | Referencias |
|---|-----------------------------|-------------------------------|--|---------------------------------|------------------|---|
| Betabel (<i>Beta vulgaris</i>) | GA (15 %) | FD | T(°C) = 40; Luz = no; RH % = 20 | 0.574 | 350.84 | Chranioti et al., 2015 Antigo et al., 2017 |
| | GA-almidón modificado (1:1) | FD | T(°C) = 40; Luz = no; RH % = 20 | 0.637 | 312.62 | |
| | GX-MDX (0.5:99.5) | SD | pH = 3; T(°C) = 30; O ₂ = no | 127.3 | 5.4 | |
| | | | pH = 4; T(°C) = 30; O ₂ = no | 119.1 | 5.8 | |
| | | | pH = 5; T(°C) = 30; O ₂ = no | 108.4 | 6.3 | |
| | | | pH = 6; T(°C) = 30; O ₂ = no | 118.8 | 5.8 | |
| | GX-MDX (0.5:99.5) | FD | pH = 3; T(°C) = 30; O ₂ = no | 91.3 | 7.6 | |
| | | | pH = 4; T(°C) = 30; O ₂ = no | 91.8 | 7.5 | |
| | | | pH = 5; T(°C) = 30; O ₂ = no | 105.7 | 6.5 | |
| | | | pH = 6; T(°C) = 30; O ₂ = no | 101.4 | 6.8 | |
| Jugo de cereza brasileña (<i>Eugenia uniflora L.</i>) | GX | FD | Luz = sí | - | - | Rutz et al., 2013 |
| | GT | | Luz = sí | - | - | |
| | GX-GT (1:1) | | Luz = sí | - | - | |
| Azafrán (<i>Crocus sativus</i>) | GA | FD | T(°C) = 40; Luz = no; RH % = 20 | 0.819 | 242.13 | Chranioti et al., 2015 |
| | GA-almidón modificado (1:1) | | T(°C) = 40; Luz = no; RH % = 20 | 0.602 | 329.84 | |
| Astaxantinas de <i>Haematococcus pluvialis</i> | GA | SD | T(°C) = 30 | - | - | Bustos-Garza et al., 2013 |
| | GA-inulina (1:1) | | T(°C) = 40 | - | - | |
| | GA-MDX (1:1) | | T(°C) = 50 | - | - | |
| | GA-WPC (1:1) | | pH = 3; T(°C) = 25 | - | - | |
| | GA-inulina (0.25:0.75) | | pH = 4; T(°C) = 25 | - | - | |
| | GA-MDX (0.25:0.75) | | pH = 5; T(°C) = 25 | - | - | |
| | GA-WPC (0.25:0.75) | | pH = 6; T(°C) = 25 | - | - | |
| | | | pH = 7; T(°C) = 25 | - | - | |
| | | | | | | |
| Achiote (bixina) (<i>Bixa orellana</i>) | GA-MDX (1:1) | SD | Luz = sí | 15.7 | 44.15 | De Marco et al., 2013 |
| | | | Luz = no | 3 | 231.05 | |

Tabla III. Cinéticas de degradación de los pigmentos microencapsulados (continuación)

| Fuente | Goma ^a | Método de secado ^b | Condiciones de almacenamiento ^c | $k \times 10^3$ (días ⁻¹) | $t_{1/2}$ (días) | Referencias |
|--|-------------------|-------------------------------|--|---------------------------------------|------------------|------------------------------|
| Cantaxantinas de <i>Dietzia natronolimnaea</i> | GA | SD | T(°C) = 4; Luz = sí | - | - | Hojjati <i>et al.</i> , 2014 |
| | | | T(°C) = 25; Luz = sí | - | - | |
| | | | T(°C) = 45; Luz = sí | - | - | |
| | | | T(°C) = 4; Luz = no | - | - | |
| | | | T(°C) = 25; Luz = no | - | - | |
| | | | T(°C) = 45; Luz = no | - | - | |
| Paprika (<i>Capsicum annuum</i>) | GA (0.03 %) | SD | T(°C) = 35; RH % = 10.8 | 33.09 | 20.947 | Rascón <i>et al.</i> , 2011 |
| | | | T(°C) = 35; RH % = 31.8 | 55.73 | 12.438 | |
| | | | T(°C) = 35; RH % = 51.5 | 123.89 | 5.595 | |
| | | | T(°C) = 35; RH % = 74.3 | 31.6 | 21.935 | |
| | | | T(°C) = 35; RH % = 10.8 | 37.33 | 18.568 | |
| | | | T(°C) = 35; RH % = 31.8 | 55.41 | 12.509 | |
| | | | T(°C) = 35; RH % = 51.5 | 130.17 | 5.325 | |
| | | | T(°C) = 35; RH % = 74.3 | 31.6 | 21.935 | |

^a GA, goma arábiga; GMez, goma de mezquite; GX, goma xantana; GT, goma tara; MDX, maltodextrina; WPC, concentrado de proteína de suero de leche SP; ^b secado por atomización (*spray drying*); FD, liofilización (*freeze drying*); ^c T (°C), temperatura en grados centígrados; O₂, oxígeno; RH %, humedad relativa.

4. Aplicación de pigmentos microencapsulados en matrices alimenticias

Es importante evaluar la estabilidad de los pigmentos en matrices alimenticias, ya que aún son pocos los estudios que han reportado los efectos de la incorporación de pigmentos en alimentos (tabla IV).

Xu, Cheng, Liu y Zhu (2019) incorporaron extractos de morera (*Morus alba*) como antioxidantes y colorantes en jamón y observaron que la adición de los microencapsulados inhibía la oxidación de lípidos y proteínas durante la preparación y el almacenamiento del producto.

Los pigmentos microencapsulados también se utilizan en golosinas. La incorporación de antocianinas de la piel de berenjena (*Solanum melongena*) para la elaboración de gomitas ha reportado mejoras en el color y buena aceptabilidad sensorial cuando se agrega del 1 al 1.5 % de polvo (Sarabandi *et al.*, 2019).

Otros trabajos han evaluado los resultados de su uso con goma de mascar como matriz alimenticia, incorporando betalaínas de betabel (*Beta vulgaris*) (Chranioti *et al.*, 2015), carotenoides de azafrán (*Crocus sativus*) (Chranioti *et al.*, 2015) o de microalgas (*Nannochloropsis oculata*; *Isochrysis galbana*) (Palabiyik *et al.*, 2018). En todos los casos, se observó que la incorporación de los pigmentos microencapsulados incrementó el color e hizo más agradables los productos. De igual forma, carotenoides de zanahoria (*Daucus carota*) han sido incorporados en caramelos macizos, donde las características físicas de la matriz alimenticia minimizaron el contacto con el ambiente, manteniendo los pigmentos adicionados (Shaaruddin *et al.*, 2019).

La incorporación de pigmentos microencapsulados a productos que sufren cambios de temperatura, específicamente el proceso de cocción en la elaboración de pan, también ha sido evaluada. Tatar Turan *et al.* (2015) observaron la incorporación

de antocianinas de mora azul con GG, mientras que Papillo *et al.* (2018) examinaron la de arroz negro con GA (*Oryza sativa* L., var. Artemide). Se ha notado que, si bien existe una reducción en las antocianinas debido al calor, la microencapsulación protege los pigmentos de la degradación térmica. Sin un cambio de color aparente, los resultados son favorables, ya que a altas temperaturas los compuestos polifenoles, como las antocianinas, generan *O*-quinonas con tonalidades cafés (Sant'Anna *et al.*, 2013). Asimismo, se han evaluado los efectos del uso de carotenoides en pan y se observa que al adicionar licopeno encapsulado con almidón modificado, la encapsulación protegió a los pigmentos durante el horneado (Rocha *et al.*, 2012). Por su parte, Ursache *et al.* (2018) incorporaron carotenoides encapsulados con GA en *muffins* (panecillos); los panelistas prefirieron aquellos que contenían carotenoides debido a que el color amarillo resultaba más agradable. Los autores mencionan que, además del color, la adición de los carotenoides tuvo un efecto antimicrobiano, ya que durante el almacenamiento de los panecillos no se observó el crecimiento de hongos ni levaduras.

Otros productos en los que se ha analizado los efectos de la adición de pigmentos microencapsulados son las bebidas sin alcohol adicionadas con bixina de achiote sabor mandarina (Tupuna *et al.*, 2018) y con betalaínas de tuna roja (*Opuntia stricta*) (Obón *et al.*, 2009); gelatinas con antocianinas de pulpa de jussara (*Euterpe edulis Martius*) (Bernardes *et al.*, 2019); helado con antocianinas de mora azul (Tatar Turan *et al.*, 2015); y yogur con betalaínas de pitaya (*Stenocereus pruinosus*) (Vargas-Campos *et al.*, 2018) y tuna roja (Obón *et al.*, 2009). En todos los casos se reportaron mejoras tanto en el color como en las propiedades antioxidantes debido a la presencia de los pigmentos. Vemos entonces que los pigmentos microencapsulados son una fuente importante de antioxidantes que puede incorporarse a la dieta a través del consumo de alimentos comunes.

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Los métodos de encapsulación mediante secado por atomización y liofilización son eficaces en la protección de los pigmentos, incrementando su estabilidad y ayudando a obtener polvos de fácil incorporación a diferentes productos. Con base en los

Tabla IV. Incorporación de pigmentos microencapsulados a matrices alimenticias

| Fuente | Adición a alimentos | Referencias |
|---|--|------------------------------------|
| Antocianinas | | |
| Pulpa de morera (<i>Morus alba</i>) | Antioxidante y colorante en jamón de cerdo | Xu <i>et al.</i> , 2019 |
| Extracto de mora azul (<i>Vaccinium corymbosum</i>) | Helado y pan | Tatar Turan <i>et al.</i> , 2015 |
| Extracto de bagazo de uva | Películas activas biodegradables | Stoll <i>et al.</i> , 2016 |
| Extracto de piel de berenjena (<i>Solanum melongena</i>) | Gomitas | Sarabandi <i>et al.</i> , 2019 |
| Arroz negro (<i>Oryza sativa</i> L.) | Biscochos | Papillo <i>et al.</i> , 2018 |
| Jussara (<i>Euterpe edulis Marius</i>) | Gelatinas | Bernardes <i>et al.</i> , 2019 |
| Betalaínas | | |
| Betabel (<i>Beta vulgaris</i>) | Goma de mascar | Chranioti <i>et al.</i> , 2015 |
| Pitaya (<i>Stenocereus pruinosus</i>) | Yogur | Vargas-Campos <i>et al.</i> , 2018 |
| Tuna roja (<i>Opuntia stricta</i>) | Yogur y bebidas | Obón <i>et al.</i> , 2009 |
| Carotenoides | | |
| Azafrán (<i>Crocus sativus</i>) | Goma de mascar | Chranioti <i>et al.</i> , 2015 |
| Zanahoria (<i>Daucus carota</i>) | Caramelo macizo | Shaaruuddin <i>et al.</i> , 2019 |
| Semillas de achiote (<i>Bixa orellana</i>) | Bebida isotónica sabor mandarina | Tupuna <i>et al.</i> , 2018 |
| Sea buckthorn (<i>Hippophae rhamnoides</i> L.) | <i>Muffins</i> (sustitución del 6 % del total de harina) | Ursache <i>et al.</i> , 2018 |
| Microalgas (<i>Nannochloropsis oculata; Isochrysis galbana</i>) | Goma de mascar | Palabiyik <i>et al.</i> , 2018 |
| Licopeno comercial | Pastel | Rocha <i>et al.</i> , 2012 |

estudios presentados en esta revisión, las gomas muestran una excelente protección de los pigmentos con ambos métodos de encapsulación. La goma arábiga, la goma de mezquite, la goma xantana y la goma guar pueden ser utilizadas para la encapsulación de pigmentos (antocianinas, betalaínas y carotenoides), pero es necesario seleccionar las condiciones óptimas de encapsulación, así como tener en cuenta la interacción entre el agente encapsulante y el compuesto activo, el método de encapsulación, y las condiciones de operación. En particular, debido a las propiedades físicas de las soluciones, vemos que la goma arábiga y la de mezquite son más adecuadas para el secado por atomización, mientras que la goma xantana y la guar lo son para la liofilización.

Se debe agregar que, si bien la estabilidad de los pigmentos mejora después de la microencapsulación, factores como la temperatura, la exposición a la luz, el oxígeno, el tiempo, y los niveles de pH, son los más importantes durante el almacenamiento e incorporación. A pesar de ello, se observa que, sin importar el pigmento microencapsulado, el agente encapsulante o el método de encapsulación, la adición de los pigmentos mejora los productos tanto visual como nutricionalmente.

Finalmente, vale la pena notar que aún es necesario el estudio de la degradación sobre condiciones reales de incorporación, así como del consumo de estos productos después de la adición de los pigmentos microencapsulados con los diferentes agentes encapsulantes mencionados en la revisión. Ambos son campos de investigación importantes para futuros trabajos.

AGRADECIMIENTOS

El autor Jiménez-González, O. agradecen 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 apoyo para la realización de sus estudios doctorales en Ciencia de Alimentos.

REFERENCIAS

- Aguiar, J., Estevinho, B. N. y Santos, L. (2016). Microencapsulation of natural antioxidants for food application - The specific case of coffee antioxidants - A review. *Trends in Food Science & Technology*, 58, 21-39. doi: 10.1016/j.tifs.2016.10.012
- Ahmad, S., Ahmad, M., Manzoor, K., Purwar, R. y Ikram, S. (2019). A review on latest innovations in natural gums based hydrogels: preparations & applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 136, 870-890. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.06.113
- Akhavan Mahdavi, S., Jafari, S. M., Assadpour, E., & Ghorbani, M. (2016). Storage stability of encapsulated barberry's anthocyanin and its application in jelly formulation. *Journal of Food Engineering*, 181, 59-66. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2016.03.003
- Álvarez-Henao, M. V., Saavedra, N., Medina, S., Jiménez Cartagena, C., Alzate, L. M. y Londoño-Londoño, J. (2018). Microencapsulation of lutein by spray-drying: characterization and stability analyses to promote its use as a functional ingredient. *Food Chemistry*, 256, 181-187. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.02.059
- Antigo, J. L. D., Bergamasco, R. de C. y Madrona, G. S. (2017). Effect of pH on the stability of red beet extract (*Beta vulgaris* L.) microcapsules produced by spray drying or freeze drying. *Food Science and Technology*, 38(1), 72-77. doi: 10.1590/1678-457X.34316
- Bakry, A. M., Abbas, S., Ali, B., Majeed, H., Abouelwafa, M. Y., Mousa, A. y Liang, L. (2016). Microencapsulation of oils: a comprehensive review of benefits, techniques, and applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(1), 143-182. doi: 10.1111/1541-4337.12179
- Başlar, M., Karasu, S., Kılıçlı, M., Us, A. A. y Sağdıç, O. (2014). Degradation kinetics of bioactive compounds and antioxidant activity of pomegranate arils during the drying process. *International Journal of Food Engineering*, 10(4), 839-848. doi: 10.1515/ijfe-2014-0080
- Beristain, C. I., Azuara, E. y Vernon-Carter, E. J. (2002). Effect of water activity on the stability to oxidation of spray-dried encapsulated orange peel oil using mesquite gum (*Prosopis juliflora*) as wall material. *Journal of Food Science*, 67(1), 206-211. doi: 10.1111/j.1365-2621.2002.tb11385.x
- Beristain, C. I., García, H. S. y Vernon-Carter, E. J. (2001). Spray-dried encapsula-

- tion of cardamom (*Elettaria Cardamomum*) essential oil with mesquite (*Prosopis juliflora*) gum. *LWT - Food Science and Technology*, 34(6), 398-401. doi: 10.1006/fstl.2001.0779
- Beristain, C. I. y Vernon-Carter, E. J. (1994). Utilization of mesquite (*Prosopis juliflora*) gum as emulsion stabilizing agent for spray drying encapsulated orange peel oil. *Drying Technology*, 12(7), 1727-1733. doi: 10.1080/07373939408962195
- Bernardes, A. L., Moreira, J. A., Tostes, M. das G. V., Costa, N. M. B., Silva, P. I. y Costa, A. G. V. (2019). In vitro bioaccessibility of microencapsulated phenolic compounds of jussara (*Euterpe edulis Martius*) fruit and application in gelatine model-system. *LWT*, 102, 173-180. doi: 10.1016/j.lwt.2018.12.009
- Bhandari, B. R. y Howes, T. (1999). Implication of glass transition for the drying and stability of dried foods. *Journal of Food Engineering*, 40(1-2), 71-79. doi: 10.1016/S0260-8774(99)00039-4
- Bhandari, B. R., Senoussi, A., Dumoulin, E. D. y Lebert, A. (1993). Spray drying of concentrated fruit juices. *Drying Technology*, 11(5), 1081-1092. doi: 10.1080/07373939308916884
- Bonilla-Ahumada, F. de J., Khandual, S. y Lugo-Cervantes, E. del C. (2018). Microencapsulation of algal biomass (*Tetraselmis chuii*) by spray-drying using different encapsulation materials for better preservation of beta-carotene and antioxidant compounds. *Algal Research*, 36, 229-238. doi: 10.1016/j.algal.2018.10.006
- Bosquez-Molina, E., Guerrero-Legarreta, I. y Vernon-Carter, E. J. (2003). Moisture barrier properties and morphology of mesquite gum-candelilla wax based edible emulsion coatings. *Food Research International*, 36(9-10), 885-893. doi: 10.1016/S0963-9969(03)00097-8
- Bustos-Garza, C., Yáñez-Fernández, J. y Barragán-Huerta, B. E. (2013). Thermal and pH stability of spray-dried encapsulated astaxanthin oleoresin from *Haematococcus pluvialis* using several encapsulation wall materials. *Food Research International*, 54(1), 641-649. doi: 10.1016/j.foodres.2013.07.061
- Cai, X., Du, X., Cui, D., Wang, X., Yang, Z. y Zhu, G. (2019). Improvement of stability of blueberry anthocyanins by carboxymethyl starch/xanthan gum combinations microencapsulation. *Food Hydrocolloids*, 91, 238-245. doi: 10.1016/j.foodhyd.2019.01.034
- Çam, M., İçyer, N. C. y Erdoğan, F. (2014). Pomegranate peel phenolics: microencapsulation, storage stability and potential ingredient for functional food development. *LWT - Food Science and Technology*, 55(1), 117-123. doi: 10.1016/j.lwt.2013.09.011
- Cano-Barrita, P. F. de J. y León-Martínez, F. M. (2016). Biopolymers with viscosity-enhancing properties for concrete. En F. Pacheco-Torgal, et al. (Eds.), *Biopolymers and Biotech Admixtures for Eco-Efficient Construction Materials* (pp. 221-252). doi: 10.1016/B978-0-08-100214-8.00011-7
- Carrillo-Navas, H., González-Rodea, D. A., Cruz-Olivares, J., Barrera-Pichardo, J. F., Román-Guerrero, A. y Pérez-Alonso, C. (2011). Storage stability and physico-chemical properties of passion fruit juice microcapsules by spray-drying. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10(3), 421-430.
- Castro-Enríquez, D. D., Montaño-Leyva, B., Del Toro-Sánchez, C. L., Juaréz-Onofre, J. E., Carvajal-Millan, E., Burriel-Ibarra, S. E., Tapia-Hernández, J. A., Barreras-Urbina, C. G. y Rodríguez-Félix, F. (2019). Stabilization of betalains by encapsulation—a review. *Journal of Food Science and Technology*, 57(5), 1587-1600. doi: 10.1007/s13197-019-04120-x
- Chawla, H., Parle, M., Sharma, K. y Yadav, M. (2016). Beetroot: a health promoting functional food. *Inventi Rapid: Nutraceuticals*, 1(1), 8-12.
- Chranioti, C., Nikoloudaki, A. y Tzia, C. (2015). Saffron and beetroot extracts encapsulated in maltodextrin, gum Arabic, modified starch and chitosan: incorporation in a chewing gum system. *Carbohydrate Polymers*, 127, 252-263. doi: 10.1016/j.carbpol.2015.03.049
- Clark, J. P. (2009). Freeze Drying. En J. P. Clark (Ed.), *Case Studies in Food Engineering* (pp. 67-73). doi: 10.1007/978-1-4419-0420-1_8
- Clydesdale, F. M. (1993). Color as a factor in food choice. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 33(1), 83-101. doi: 10.1080/10408399309527614
- Corrêa, R. C. G., Garcia, J. A. A., Correa, V. G., Vieira, T. F., Bracht, A. y Peralta, R. M. (2019). Pigments and vitamins from plants as functional ingredients: current trends and perspectives. *Advances in Food and Nutrition Research*, 90, 259-303. doi: 10.1016/bs.afnr.2019.02.003
- De Marco, R., Vieira, A. M. S., Ugri, M. C. A., Monteiro, A. y Bergamasco, R. de C. (2013). Microencapsulation of annatto seed extract: stability and application. *Chemical Engineering Transactions*, 32, 1777-1782. doi: 10.3303/CET1332297
- Dolinsky, A. A. (2001). High-temperature spray drying. *Drying Technology*, 19(5), 785-806. doi: 10.1081/DRT-100103770
- Ephrem, E., Najjar, A., Charcosset, C. y Greige-Gerges, H. (2018). Encapsulation of natural active compounds, enzymes, and probiotics for fruit juice fortification,

- preservation, and processing: an overview. *Journal of Functional Foods*, 48, 65-84. doi: 10.1016/j.jff.2018.06.021
- Fang, Z. y Bhandari, B. (2012). Spray drying, freeze drying and related processes for food ingredient and nutraceutical encapsulation. En N. Garti y D. J. McClements (Eds.), *Encapsulation Technologies and Delivery Systems for Food Ingredients and Nutraceuticals* (pp. 73-109). doi: 10.1533/9780857095909.2.73
- Francis, F. J. (1995). Quality as influenced by color. *Food Quality and Preference*, 6(3), 149-155. doi: 10.1016/0950-3293(94)00026-R
- Fu, D., Deng, S., McClements, D. J., Zhou, L., Zou, L., Yi, J., Lui, C. y Liu, W. (2019). Encapsulation of β-carotene in wheat gluten nanoparticle-xanthan gum-stabilized Pickering emulsions: enhancement of carotenoid stability and bioaccessibility. *Food Hydrocolloids*, 89, 80-89. doi: 10.1016/j.foodhyd.2018.10.032
- Garber, L. L., Hyatt, E. M. y Nafees, L. (2016). The effects of analogous food color on perceived flavor: a factorial investigation. *Journal of Food Products Marketing*, 22(4), 486-500. doi: 10.1080/10454446.2015.1072866
- García-Márquez, E., Román-Guerrero, A., Cruz-Sosa, F., Lobato-Calleros, C., Álvarez-Ramírez, J., Vernon-Carter, E. J. y Espinosa-Andrews, H. (2015). Effect of layer (calcium phosphate-chitosan)-by-layer (mesquite gum) matrix on carotenoids-in-water-emulsion properties. *Food Hydrocolloids*, 43, 451-458. doi: 10.1016/j.foodhyd.2014.07.005
- George, A., Shah, P. A. y Shrivastav, P. S. (2019). Guar gum: versatile natural polymer for drug delivery applications. *European Polymer Journal*, 112, 722-735. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2018.10.042
- Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voilley, A. y Saurel, R. (2007). Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: an overview. *Food Research International*, 40(9), 1107-1121. doi: 10.1016/j.foodres.2007.07.004
- Gomez-Estaca, J., Comunian, T. A., Montero, P., Ferro-Furtado, R. y Favaro-Trindade, C. S. (2016). Encapsulation of an astaxanthin-containing lipid extract from shrimp waste by complex coacervation using a novel gelatin-cashew gum complex. *Food Hydrocolloids*, 61, 155-162. doi: 10.1016/j.foodhyd.2016.05.005
- Gupta, V. K., Sood, S., Agarwal, S., Saini, A. K. y Pathania, D. (2018). Antioxidant activity and controlled drug delivery potential of tragacanth gum-cl- poly (lactic acid-co-itaconic acid) hyidrogel. *International Journal of Biological Macromolecules*, 107(B), 2534-2543. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.10.138
- Haas, K., Obernberger, J., Zehetner, E., Kiesslich, A., Volkert, M. y Jaeger, H. (2019). Impact of powder particle structure on the oxidation stability and color of encapsulated crystalline and emulsified carotenoids in carrot concentrate powders. *Journal of Food Engineering*, 263, 398-408. doi: 10.1016/j.jfooodeng.2019.07.025
- Habibi, H. y Khosravi-Darani, K. (2017). Effective variables on production and structure of xanthan gum and its food applications: a review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 10, 130-140. doi: 10.1016/j.bcab.2017.02.013
- Hamdani, A. M., Wani, I. A. y Bhat, N. A. (2019). Sources, structure, properties and health benefits of plant gums: a review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 135, 46-61. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.05.103
- Hasan, A. M. A. y Abdel-Raouf, M. E. (2018). Applications of guar gum and its derivatives in petroleum industry: a review. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(4), 1043-1050. doi: 10.1016/j.ejpe.2018.03.005
- He, J. y Giusti, M. M. (2010). Anthocyanins: natural colorants with health-promoting properties. *Annual Review of Food Science and Technology*, 1(1), 163-187. doi: 10.1146/annurev.food.080708.100754
- Hojjati, M., Razavi, S. H., Rezaei, K. y Gilani, K. (2014). Stabilization of canthaxanthin produced by *Dietzia natronolimnaea* HS-1 with spray drying microencapsulation. *Journal of Food Science and Technology*, 51(9), 2134-2140. doi: 10.1007/s13197-012-0713-0
- Jain, A., Thakur, D., Ghoshal, G., Katre, O. P. y Shivhare, U. S. (2016). Characterization of microcapsulated β-carotene formed by complex coacervation using casein and gum tragacanth. *International Journal of Biological Macromolecules*, 87, 101-113. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2016.01.117
- Janiszewska, E. (2014). Microencapsulated beetroot juice as a potential source of betalain. *Powder Technology*, 264, 190-196. doi: 10.1016/j.powtec.2014.05.032
- Jiménez-Aguilar, D. M., Ortega-Regules, A. E., Lozada-Ramírez, J. D., Pérez-Pérez, M. C. I., Vernon-Carter, E. J. y Welti-Chanes, J. (2011). Color and chemical stability of spray-dried blueberry extract using mesquite gum as wall material. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24(6), 889-894. doi: 10.1016/j.jfca.2011.04.012
- Jimenez-Gonzalez, O., Ruiz-Espinosa, H., Luna-Guevara, J. J., Ochoa-Velasco, C. E., Luna Vital, D. y Luna-Guevara, M. L. (2018). A potential natural coloring agent with antioxidant properties: microencapsulates of *Renealmia alpinia* (Rottb.) Maas fruit pericarp. *NFS Journal*, 13, 1-9. doi: 10.1016/j.nfs.2018.08.001
- Kuck, L. S. y Noreña, C. P. Z. (2016). Microencapsulation of grape (*Vitis labrusca* var. *Bordo*) skin phenolic extract using gum Arabic, polydextrose, and partially hydrolyzed guar gum as encapsulating agents. *Food Chemistry*, 194, 569-576. doi: 10.1016/j.foodchem.2015.08.066
- Kumar, A., Rao, K. M. y Han, S. S. (2018). Application of xanthan gum as polysaccharide in tissue engineering: a review. *Carbohydrate Polymers*, 180, 128-144. doi: 10.1016/j.carbpol.2017.10.009
- Kshirsagar, A. C., Yenge, V., Sarkar, A., Zamre, M. y Singhal, R. S. (2010). Evaluation of microencapsulated turmeric oleoresin for pre-extrusion coloring using response surface methodology. *Journal of Food Processing and Preservation*, 34(2), 302-315. doi: 10.1111/j.1745-4549.2009.00371.x
- Labuschagne, P. (2018). Impact of wall material physicochemical characteristics on the stability of encapsulated phytochemicals: a review. *Food Research International*, 107, 227-247. doi: 10.1016/j.foodres.2018.02.026
- Lehto, S., Buchweitz, M., Klimm, A., Straßburger, R., Bechtold, C. y Ulberth, F. (2017). Comparison of food colour regulations in the EU and the US: A review of cu-

- rent provisions. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 34(3), 335-355. doi: 10.1080/19440049.2016.1274431
- Ling, B., Tang, J., Kong, F., Mitcham, E. J. y Wang, S. (2015). Kinetics of food quality changes during thermal processing: a review. *Food and Bioprocess Technology*, 8(2), 343-358. doi: 10.1007/s11947-014-1398-3
- López-Franco, Y., Higuera-Ciapara, I., Lizardi-Mendoza, J., Goycoolea, F. M. y Wang, W. (2009). Other exudates: Tragacanth, karaya, mesquite gum and larchwood arabinogalactan. En G. O. Phillips y P. A. Williams (Eds.) *Handbook of Hydrocolloids* (pp. 495-534). doi: 10.1533/9781845695873.495
- Mahdavi, S. A., Jafari, S. M., Ghorbani, M. y Assadpoor, E. (2014). Spray-drying microencapsulation of anthocyanins by natural biopolymers: a review. *Drying Technology*, 32(5), 509-518. doi: 10.1080/07373937.2013.839562
- Mahdi Jafari, S., He, Y. y Bhandari, B. (2006). Nano-emulsion production by sonication and microfluidization—a comparison. *International Journal of Food Properties*, 9(3), 475-485. doi: 10.1080/10942910600596464
- Martins, N., Roriz, C. L., Morales, P., Barros, L. y Ferreira, I. C. F. R. (2016). Food colorants: challenges, opportunities and current desires of agro-industries to ensure consumer expectations and regulatory practices. *Trends in Food Science & Technology*, 52, 1-15. Doi: 10.1016/j.tifs.2016.03.009
- Mishra, M. (Ed.). (2015). *Handbook of Encapsulation and Controlled Release*. CRC Press. doi: 10.1201/b19038
- Morais, A. R. do V., Alencar, É. do N., Xavier Júnior, F. H., De Oliveira, C. M., Marcelino, H. R., Barratt, G., Fessi, H., Do Egito, E. S. y Elaissari, A. (2016). Freeze-drying of emulsified systems: a review. *International Journal of Pharmaceutics*, 503(1-2), 102-114. doi: 10.1016/j.ijpharm.2016.02.047
- Moser, P., Telis, V. R. N., De Andrade Neves, N., García-Romero, E., Gómez-Alonso, S. y Hermosín-Gutiérrez, I. (2017). Storage stability of phenolic compounds in powdered BRS Violeta grape juice microencapsulated with protein and maltodextrin blends. *Food Chemistry*, 214, 308-318. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.07.081
- Naik, R., Arunsandeep, G. & Chandramohan, V. (2017). Numerical simulation for freeze drying of skimmed milk with moving sublimation front using tri-diagonal matrix algorithm. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 10(3), 813-818. doi: 10.18869/acadpub.jafm.73.240.27054
- Ngamwonglumlert, L., Devahastin, S. y Chiewchan, N. (2017). Natural colorants: pigment stability and extraction yield enhancement via utilization of appropriate pretreatment and extraction methods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(15), 3243-3259. doi: 10.1080/10408398.2015.1109498
- Nie, S.-P., Wang, C., Cui, S. W., Wang, Q., Xie, M.-Y. y Phillips, G. O. (2013). A further amendment to the classical core structure of gum arabic (*Acacia senegal*). *Food Hydrocolloids*, 31(1), 42-48. doi: 10.1016/j.foodhyd.2012.09.014
- Niu, B., Shao, P., Luo, Y. y Sun, P. (2020). Recent advances of electrosprayed particles as encapsulation systems of bioactives for food application. *Food Hydrocolloids*, 99, 105376. doi: 10.1016/j.foodhyd.2019.105376
- Obón, J. M., Castellar, M. R., Alacid, M. y Fernández-López, J. A. (2009). Production of a red-purple food colorant from *Opuntia stricta* fruits by spray drying and its application in food model systems. *Journal of Food Engineering*, 90(4), 471-479. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2008.07.013
- Ochoa-Velasco, C. E., Salazar-González, C., Cid-Ortega, S. y Guerrero-Beltrán, J. A. (2017). Antioxidant characteristics of extracts of *Hibiscus sabdariffa* calyces encapsulated with mesquite gum. *Journal of Food Science and Technology*, 54(7), 1747-1756. doi: 10.1007/s13197-017-2564-1
- Ozkan, G., Franco, P., De Marco, I., Xiao, J. y Capanoglu, E. (2019). A review of microencapsulation methods for food antioxidants: Principles, advantages, drawbacks and applications. *Food Chemistry*, 272, 494-506. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.07.205
- Paakki, M., Sandell, M. y Hopia, A. (2019). Visual attractiveness depends on colorfulness and color contrasts in mixed salads. *Food Quality and Preference*, 76, 81-90. doi: 10.1016/j.foodqual.2019.04.004
- Palabiyik, I., Durmaz, Y., Öner, B., Toker, O. S., Coksari, G., Konar, N. y TamTÜRK, F. (2018). Using spray-dried microalgae as a natural coloring agent in chewing gum: Effects on color, sensory, and textural properties. *Journal of Applied Phycology*, 30(2), 1031-1039. doi: 10.1007/s10811-017-1324-y
- Palaniraj, A. y Jayaraman, V. (2011). Production, recovery and applications of xanthan gum by *Xanthomonas campestris*. *Journal of Food Engineering*, 106(1), 1-12. doi: 10.1016/j.foodeng.2011.03.035
- Papillo, V. A., Locatelli, M., Travaglia, F., Bordiga, M., Garino, C., Arlorio, M. y Coisson, J. D. (2018). Spray-dried polyphenolic extract from Italian black rice (*Oryza sativa* L., var. *Artemide*) as new ingredient for bakery products. *Food Chemistry*, 269, 603-609. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.07.059
- Pavón-García, L. M. A., Pérez-Alonso, C., Orozco-Villafuerte, J., Pimentel-González, D. J., Rodríguez-Huezo, M. E. y Vernon-Carter, E. J. (2011). Storage stability of the natural colourant from *Justicia spicigera* microencapsulated in protective colloids blends by spray-drying: Colour storage stability. *International Journal of Food Science & Technology*, 46(7), 1428-1437. doi: 10.1111/j.1365-2621.2011.02634.x
- Pieczykolan, E. y Kurek, M. A. (2019). Use of guar gum, gum arabic, pectin, beta-glucan and inulin for microencapsulation of anthocyanins from chokeberry. *International Journal of Biological Macromolecules*, 129, 665-671. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.02.073
- Piqueras-Fiszman, B. y Spence, C. (2014). Colour, pleasantness, and consumption behaviour within a meal. *Appetite*, 75, 165-172. doi: 10.1016/j.appet.2014.01.004
- Pitalua, E., Jimenez, M., Vernon-Carter, E. J. y Beristain, C. I. (2010). Antioxidative activity of microcapsules with beetroot juice using gum Arabic as wall material. *Food and Bioproducts Processing*, 88(2-3), 253-258. doi: 10.1016/j.fbp.2010.01.002

- Porcherot, C., Delplanque, S., Gaudreau, N. y Cayeux, I. (2013). Seeing, smelling, feeling! Is there an influence of color on subjective affective responses to perfumed fabric softeners? *Food Quality and Preference*, 27(2), 161-169. doi: 10.1016/j.foodqual.2012.06.011
- Quan, J., Kim, S.-M., Pan, C.-H. y Chung, D. (2013). Characterization of fucosan-thin-loaded microspheres composed of cetyl palmitate-based solid lipid core and fish gelatin-gum arabic coacervate shell. *Food Research International*, 50(1), 31-37. doi: 10.1016/j.foodres.2012.09.040
- Qv, X.-Y., Zeng, Z.-P. y Jiang, J.-G. (2011). Preparation of lutein microencapsulation by complex coacervation method and its physicochemical properties and stability. *Food Hydrocolloids*, 25(6), 1596-1603. doi: 10.1016/j.foodhyd.2011.01.006
- Ramakrishnan, Y., Adzahan, N. M., Yusof, Y. A. y Muhammad, K. (2018). Effect of wall materials on the spray drying efficiency, powder properties and stability of bioactive compounds in tamarillo juice microencapsulation. *Powder Technology*, 328, 406-414. doi: 10.1016/j.powtec.2017.12.018
- Rascón, M. P., Beristain, C. I., García, H. S. y Salgado, M. A. (2011). Carotenoid retention and storage stability of spray-dried encapsulated paprika oleoresin using gum Arabic and Soy protein isolate as wall materials. *LWT - Food Science and Technology*, 44(2), 549-557. doi: 10.1016/j.lwt.2010.08.021
- Ravichandran, K., Palaniraj, R., Saw, N. M. M. T., Gabr, A. M. M., Ahmed, A. R., Knorr, D. y Smetanska, I. (2014). Effects of different encapsulation agents and drying process on stability of betalains extract. *Journal of Food Science and Technology*, 51(9), 2216-2221. doi: 10.1007/s13197-012-0728-6
- Rezende, Y. R. R. S., Nogueira, J. P. y Narain, N. (2018). Microencapsulation of extracts of bioactive compounds obtained from acerola (*Malpighia emarginata* DC) pulp and residue by spray and freeze drying: chemical, morphological and chemometric characterization. *Food Chemistry*, 254, 281-291. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.02.026
- Rezvankhah, A., Emam-Djomeh, Z. y Askari, G. (2020). Encapsulation and delivery of bioactive compounds using spray and freeze-drying techniques: a review. *Drying Technology*, 38(1-2), 235-258. doi: 10.1080/07373937.2019.1653906
- Rocha, G. A., Fávaro-Trindade, C. S. y Grossi, C. R. F. (2012). Microencapsulation of lycopene by spray drying: characterization, stability and application of microcapsules. *Food and Bioproducts Processing*, 90(1), 37-42. doi: 10.1016/j.fbp.2011.01.001
- Rodríguez-Amaya, D. B. (2016). Natural food pigments and colorants. *Current Opinion in Food Science*, 7, 20-26. doi: 10.1016/j.cofs.2015.08.004
- Rodríguez-Amaya, D. B. (2019). Update on natural food pigments - A mini-review on carotenoids, anthocyanins, and betalains. *Food Research International*, 124, 200-205. doi: 10.1016/j.foodres.2018.05.028
- Rodríguez-Rodríguez, R., Espinosa-Andrews, H., Morales-Hernández, N., Lobato-Calleros, C. y Vernon-Carter, E. J. (2018). Mesquite gum/chitosan insoluble complexes: relationship between the water state and viscoelastic properties. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 40(9), 1345-1352. doi: 10.1080/01932691.2018.1513848
- Romero-González, J., Shun Ah-Hen, K., Lemus-Mondaca, R. y Muñoz-Fariña, O. (2020). Total phenolics, anthocyanin profile and antioxidant activity of maqui, *Aristotelia chilensis* (Mol.) Stuntz, berries extract in freeze-dried polysaccharides microcapsules. *Food Chemistry*, 313, 126115. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.126115
- Rutz, J. K., Zambiasi, R. C., Borges, C. D., Krumreich, F. D., Da Luz, S. R., Hartwig, N. y Da Rosa, C. G. (2013). Microencapsulation of purple Brazilian cherry juice in xanthan, tara gums and xanthan-tara hydrogel matrixes. *Carbohydrate Polymers*, 98(2), 1256-1265. doi: 10.1016/j.carbpol.2013.07.058
- Salarbashi, D. y Tafaghodi, M. (2018). An update on physicochemical and functional properties of newly seed gums. *International Journal of Biological Macromolecules*, 119, 1240-1247. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.06.161
- Sant'Anna, V., Gurak, P. D., Ferreira Marczak, L. D. y Tessaro, I. C. (2013). Tracking bioactive compounds with colour changes in foods - A review. *Dyes and Pigments*, 98(3), 601-608. doi: 10.1016/j.dyepig.2013.04.011
- Santana, A. A., Cano-Higuita, D. M., De Oliveira, R. A. y Telis, V. R. N. (2016). Influence of different combinations of wall materials on the microencapsulation of jussara pulp (*Euterpe edulis*) by spray drying. *Food Chemistry*, 212, 1-9. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.05.148
- Santos, D., Maurício, A. C., Sencadas, V., Santos, J. D., Fernandes, M. H. y Gomes, P. S. (2018). Spray drying: an overview. En R. Pignatello y T. Musumeci (Eds.), *Biopolymers - Physics and Chemistry - New Edition*. InTech. doi: 10.5772/intechopen.72247
- Sarabandi, K., Jafari, S. M., Mahoonak, A. S. y Mohammadi, A. (2019). Application of gum Arabic and maltodextrin for encapsulation of eggplant peel extract as a natural antioxidant and color source. *International Journal of Biological Macromolecules*, 140, 59-68. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.08.133
- Scotter, M. J. (2011). Emerging and persistent issues with artificial food colours: natural colour additives as alternatives to synthetic colours in food and drink. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 3(1), 28-39. doi: 10.1111/j.1757-837X.2010.00087.x
- Shaaruddin, S., Mahmood, Z., Ismail, H., Mohd Ghazali, H., Hamzah, Mohd. Y. y Muhammad, K. (2019). Stability of β-carotene in carrot powder and sugar confection as affected by resistant maltodextrin and octenyl succinate anhydride (OSA) starches. *Journal of Food Science and Technology*, 56(7), 3461-3470. doi: 10.1007/s13197-019-03832-4
- Shaddel, R., Hesari, J., Azadmard-Damirchi, S., Hamishehkar, H., Fathi-Achachlouei, B. y Huang, Q. (2018). Use of gelatin and gum Arabic for encapsulation of black raspberry anthocyanins by complex coacervation. *International*

- Journal of Biological Macromolecules*, 107, 1800-1810. doi: 10.1016/j.jbiomac.2017.10.044
- Sharma, G., Sharma, S., Kumar, A., Al-Muhtaseb, A. H., Naushad, Mu., Ghfar, A. A., Mola, G. T. y Stadler, F. J. (2018). Guar gum and its composites as potential materials for diverse applications: a review. *Carbohydrate Polymers*, 199, 534-545. doi: 10.1016/j.carbpol.2018.07.053
- Spence, C. (2015). Visual contributions to taste and flavour perception. En M. J. Scotter, *Colour Additives for Foods and Beverages* (pp. 189-210). doi: 10.1016/B978-1-78242-011-8.00007-6
- Spence, C., Levitan, C. A., Shankar, M. U. y Zampini, M. (2010). Does food color influence taste and flavor perception in humans? *Chemosensory Perception*, 3(1), 68-84. doi: 10.1007/s12078-010-9067-z
- Steiner, B. M., McClements, D. J. y Davidov-Pardo, G. (2018). Encapsulation systems for lutein: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 82, 71-81. doi: 10.1016/j.tifs.2018.10.003
- Stoll, L., Costa, T. M. H., Jablonski, A., Flôres, S. H. y De Oliveira Rios, A. (2016). Microencapsulation of Anthocyanins with Different Wall Materials and Its Application in Active Biodegradable Films. *Food and Bioprocess Technology*, 9(1), 172-181. doi: 10.1007/s11947-015-1610-0
- Sukkhai, S., Kijroongrojana, K., Chonpracha, P., Pujols, K. D., Alonso-Mareno, J. R., Ardo, R. y Prinyawiwatkul, W. (2018). Effects of colorant concentration and 'natural colour' or 'sodium content' claim on saltiness perception, consumer liking and emotion, and purchase intent of dipping sauces. *International Journal of Food Science & Technology*, 53(5), 1246-1254. doi: 10.1111/ijfs.13704
- Taheri, A. y Jafari, S. M. (2019). Gum-based nanocarriers for the protection and delivery of food bioactive compounds. *Advances in Colloid and Interface Science*, 269, 277-295. doi: 10.1016/j.cis.2019.04.009
- Tatar Turan, F., Cengiz, A. y Kahyaoglu, T. (2015). Evaluation of ultrasonic nozzle with spray-drying as a novel method for the microencapsulation of blueberry's bioactive compounds. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 32, 136-145. doi: 10.1016/j.ifset.2015.09.011
- Thakur, D., Jain, A., Ghoshal, G., Shrivhare, U. S. y Katre, O. P. (2017). Microencapsulation of β -carotene based on casein/guar gum blend using zeta potential-yield stress phenomenon: an approach to enhance photo-stability and retention of functionality. *AAPS PharmSciTech*, 18(5), 1447-1459. doi: 10.1208/s12249-017-0806-1
- Tupuna, D. S., Paese, K., Guterres, S. S., Jablonski, A., Flôres, S. H. y De Oliveira Rios, A. (2018). Encapsulation efficiency and thermal stability of norbixin microencapsulated by spray-drying using different combinations of wall materials. *Industrial Crops and Products*, 111, 846-855. doi: 10.1016/j.indcrop.2017.12.001
- Ursache, F. M., Andronoiu, D. G., Ghinea, I. O., Barbu, V., Ioniță, E., Cotărlet, M., Dumitrașcu, L., Botez, E., Râpeanu, G. y Stănciu, N. (2018). Valorizations of carotenoids from sea buckthorn extract by microencapsulation and formulation of value-added food products. *Journal of Food Engineering*, 219, 16-24. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2017.09.015
- Vargas-Campos, L., Valle-Guadarrama, S., Martínez-Bustos, F., Salinas-Moreno, Y., Lobato-Calleros, C. y Calvo-López, A. D. (2018). Encapsulation and pigmenting potential of betalains of pitaya (*Stenocereus pruinosus*) fruit. *Journal of Food Science and Technology*, 55(7), 2436-2445. doi: 10.1007/s13197-018-3161-7
- Venil, C. K., Khasim, A. R., Aruldass, C. A. y Ahmad, W. A. (2016). Microencapsulation of flexirubin-type pigment by spray drying: Characterization and antioxidant activity. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 113, 350-356. doi: 10.1016/j.ibiod.2016.01.014
- Verma, A. y Singh, S. V. (2015). Spray drying of fruit and vegetable juices - a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(5), 701-719. doi: 10.1080/10408398.2012.672939
- Vernon-Carter, E. J., Beristain, C. I. y Pedroza-Islas, R. (2000). Mesquite gum (*Prosopis gum*). En G. Doxastakis y V. Kiosseoglou (Eds.), *Developments in Food Science Vol. 41*, (pp. 217-238). doi: 10.1016/S0167-4501(00)80011-4
- Villacrez, J. L., Carriazo, J. G. y Osorio, C. (2014). Microencapsulation of Andes berry (*Rubus glaucus* Benth.) Aqueous extract by spray drying. *Food and Bioprocess Technology*, 7(5), 1445-1456. doi: 10.1007/s11947-013-1172-y
- Wadhera, D. y Capaldi-Phillips, E. D. (2014). A review of visual cues associated with food on food acceptance and consumption. *Eating Behaviors*, 15(1), 132-143. doi: 10.1016/j.eatbeh.2013.11.003
- Xu, L., Cheng, J.-R., Liu, X.-M. y Zhu, M.-J. (2019). Effect of microencapsulated process on stability of mulberry polyphenol and oxidation property of dried minced pork slices during heat processing and storage. *LWT*, 100, 62-68. doi: 10.1016/j.lwt.2018.10.025
- Ye, Q., Georges, N. y Selomulya, C. (2018). Microencapsulation of active ingredients in functional foods: From research stage to commercial food products. *Trends in Food Science & Technology*, 78, 167-179. doi: 10.1016/j.tifs.2018.05.025
- Yu, Y. y Lv, Y. (2019). Degradation kinetic of anthocyanins from rose (*Rosa rugosa*) as prepared by microencapsulation in freeze-drying and spray-drying. *International Journal of Food Properties*, 22(1), 2009-2021. doi: 10.1080/10942912.2019.1701011
- Zhang, J., Zhang, C., Chen, X. y Quek, S. Y. (2020). Effect of spray drying on phenolic compounds of cranberry juice and their stability during storage. *Journal of Food Engineering*, 269, 109744. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2019.109744
- Zhao, C., Zhao, Q., Zhang, Y. y Zhou, M. (2015). The effect of gum Arabic on the dispersion of cement pastes. En F. Dong (Ed.), *Proceedings of the 11th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM)* (pp. 483-494). Springer. doi: 10.1007/978-3-319-13948-7_47



Modificación de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas:

factores de proceso y métodos no térmicos

J. E. González-Pérez* y A. López-Malo

*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos
Correo electrónico: julio.gonzalezpz@udlap.mx • aurelio.lopezm@udlap.mx

RESUMEN

La osmodeshidratación de frutas y hortalizas es un proceso lento debido a la resistencia en la transferencia de masa (TM). Dicha resistencia se puede modificar variando la solución osmótica, las condiciones del proceso o implementando tratamientos no térmicos (NTT). Los NTT permiten modificar la permeabilidad de la pared celular, bien por el incremento de la superficie de contacto con la disminución de la presión de vacío (pulsos de vacío), por el aumento de la presión del sistema (altas presiones hidrostáticas), o bien por la formación de poros en la membrana celular (campo eléctrico pulsado) o microcanales (ultrasonido y osmo-sonificación). Las características de la TM ocasionadas por cambios de las condiciones experimentales se pueden describir con modelos matemáticos, como la segunda ley de Fick. El objetivo de esta revisión es analizar distintos factores que modifican la TM durante la osmodeshidratación, así como la aplicación de NTT para modificarla. Además, se analizará el estudio de modelos que describen estos procesos.

Palabras clave: deshidratación osmótica, permeabilidad de la membrana celular, métodos no térmicos, transferencia de masa.

ABSTRACT

Osmodehydration of fruits and vegetables is a slow process due to resistance in mass transfer (MT). This resistance can be modified by varying the osmotic solution, the process conditions or by implementing non-thermal treatments (NTT). NTT allow modifying the permeability of the cell wall by increasing the contact surface area with the decrease in atmospheric pressure (vacuum pulses), by increasing the system pressure (high hydrostatic pressures), or by the formation of pores in the cell membrane (pulsed electric field) or microchannels (ultrasound and osmo-sonication). Mathematical models, such as Fick's second law, can be used to describe the characteristics of MT caused by changes in experimental conditions. The aim of this review is to analyze the different factors that modify MT during osmo-dehydration, as well as the application of NTT to modify it. Furthermore, it will analyze the study of models that describe these processes.

Keywords: osmotic dehydration, cell wall permeability, non-thermal treatments, mass transfer.

INTRODUCCIÓN

Las frutas y hortalizas contribuyen al adecuado balance de la dieta humana al ser una fuente crucial de compuestos nutraceuticos. Estos compuestos pueden ser vitaminas, minerales, fibra, colorantes naturales, o antioxidantes, los cuales pueden ser beneficiosos para el cuerpo humano (Ciurzyńska *et al.*, 2016; Omolola *et al.*, 2017; Ramya y Jain, 2017). No obstante, las frutas y hortalizas tienen un elevado contenido de humedad que propicia cambios bioquímicos y microbiológicos que disminuyen su vida de anaquel (Rahman, 2017; Chitrakar *et al.*, 2019). La deshidratación permite obtener alimentos de humedad baja (menor a 20 %, *p/p*) o humedad intermedia (20-50 %, *p/p*), que pueden almacenarse por largos períodos (Barbosa de Lima *et al.*, 2016; Qiu *et al.*, 2019). Los principales métodos de deshidratación involucran el uso de temperatura, lo cual puede generar pérdida de nutrientes termosensibles, además de modificaciones de características sensoriales (provocadas por reacciones químicas o enzimáticas), así como cambios morfométricos, entre otros parámetros de calidad (Sabarez, 2018; Qiu *et al.*, 2019).

La deshidratación osmótica es un método que permite obtener alimentos de humedad intermedia. Además, ayuda a inhibir el oscurecimiento enzimático, mejorando la apariencia y el sabor de frutas y hortalizas gracias a la incorporación de solutos presentes en una solución hipertónica y a la eliminación simultánea de agua (Omolola *et al.*, 2017; Ramya y Jain, 2017). Sin embargo, durante este proceso la transferencia de masa es lenta (Kuo *et al.*, 2018) y puede haber pérdida de vitaminas, minerales o algunos ácidos orgánicos a través de lixiviación de sólidos (Yadav y Singh, 2014). Para acelerar los mecanismos de transferencia de masa, se han estudiado diferentes parámetros que podrían estar involucrados en la velocidad del proceso como: el agente osmótico (composición y concentración), la matriz alimenticia (modificaciones físicas o químicas) o las condiciones de proceso (tiempo, agitación o temperatura) (Monnerat *et al.*, 2010; Pacheco-Angulo *et al.*, 2016; Fernandes y Rodrigues, 2017; Cichowska *et al.*, 2019;

González-Pérez *et al.*, 2019; Nowacka, Laghi *et al.*, 2019).

En la industria alimentaria, el principal parámetro utilizado para reducir el tiempo de operación durante el proceso de deshidratación osmótica es la temperatura. El aumento de la temperatura durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas incrementa la permeabilidad de su membrana celular y acelera la transferencia de masa (Assis *et al.*, 2016; Akharume *et al.*, 2019). Sin embargo, temperaturas elevadas pueden afectar negativamente y disminuir la calidad del producto (color, textura, sabor, entre otros) (Barbosa de Lima *et al.*, 2016; Sabarez, 2018). Algunas de las alternativas son el uso de métodos no térmicos, como las altas presiones hidrostáticas, los pulsos de vacío, los pulsos eléctricos, el ultrasonido y la osmo-sonicación (Martín-Belloso y Morales-de la Peña, 2018; Nowacka *et al.*, 2018; Dash *et al.*, 2019; de Mello *et al.*, 2019; Osae *et al.*, 2019).

La osmodeshidratación de frutas y hortalizas asistida por métodos no térmicos no afecta la calidad del producto final y permite alterar la permeabilidad de su membrana celular. Esta alteración ayuda a reducir los tiempos de proceso gracias a que incrementa la tasa de transferencia de masa (Dermeslonlouoglou *et al.*, 2016; Onwude *et al.*, 2017; Deng *et al.*, 2019).

El objetivo de esta revisión es abordar estudios recientes sobre la modificación de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas, considerando algunos parámetros de proceso y métodos no térmicos analizados a través de modelos y cinéticas de proceso.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. Mecanismos de deshidratación osmótica

La deshidratación osmótica es un proceso de deshidratación parcial de alimentos mediante la transferencia de masa por contacto sólido-líquido; consiste en la inmersión de un material alimenticio en una solución hipertónica (Pacheco-Angulo *et al.*, 2016; Muñiz-Becerá *et al.*, 2017). En la figura 1 se presenta esquemáticamente el proceso de deshidratación osmótica.

tica de frutas y hortalizas. Este proceso ocurre debido a que la concentración de solutos presentes en la solución osmótica (agente osmótico) es mayor a la de la matriz alimenticia. El agua de la matriz alimenticia (presente en el protoplasto de sus células) pasa a la solución hipertónica a través de la membrana celular (plasmalema). El plasmalema se comporta como una membrana semipermeable, ya que, además de la pérdida de agua, permite la ganancia de algunos solutos presentes en la solución osmótica (sales, azúcares, ácidos orgánicos, minerales, colorantes, entre otros). Después de atravesar el plasmalema, estos solutos ocupan el volumen entre la pared celular y el plasmalema (Ahmed *et al.*, 2016; Ciurzyńska *et al.*, 2016; Dash *et al.*, 2019). Durante este proceso, los flujos simultáneos de solutos y agua se extienden desde la superficie del producto hasta el centro del material gracias a la diferencia de presión osmótica entre la matriz alimenticia y la solución osmótica. El

proceso finaliza cuando se alcanza un estado de equilibrio osmótico, es decir, cuando la diferencia entre las presiones osmóticas es casi nula (Ahmed *et al.*, 2016).

2. Factores que afectan el proceso de deshidratación osmótica

La velocidad de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas depende de muchos factores, entre ellos la naturaleza de la matriz alimenticia, la composición del agente osmótico (tablas I y II) y las condiciones de proceso, como temperatura, velocidad de agitación o tiempo de inmersión (tabla II) (Pacheco-Angulo *et al.*, 2016; Liu y Peng, 2017; Shete *et al.*, 2018). La selección de las condiciones óptimas de cada factor de proceso depende de las características deseadas en el producto osmodeshidratado (Ciurzyńska *et al.*, 2016).

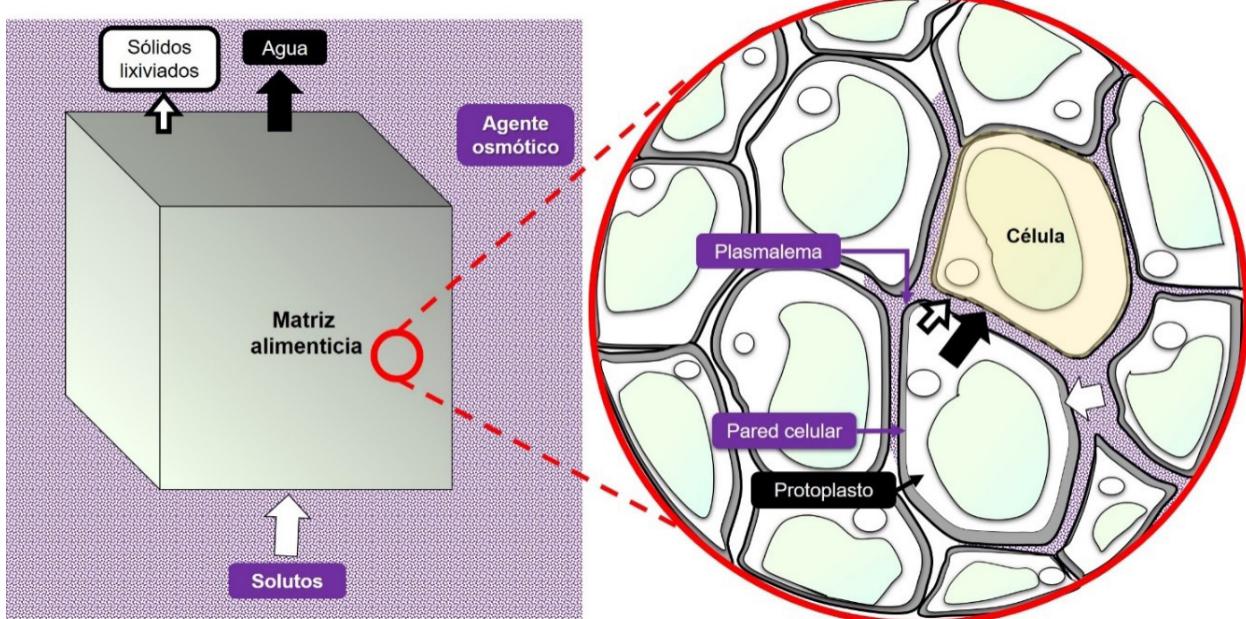


Figura 1.

Transferencia de masa durante el proceso de deshidratación osmótica de frutas u hortalizas. Adaptada de Mavroudis *et al.* (2012).

Tabla I. Transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas con diferente porosidad

| Matriz ^a | | Agente osmótico ^b | | | | | |
|---|-----------|------------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|---|-----------------|
| Fruta u hortaliza | Porosidad | NaCl ^c | | Sacarosa ^d | | Jugo concentrado de chokeberry ^d | |
| | | GS ^e | PA ^f | GS ^e | PA ^f | GS ^e | PA ^f |
| Calabaza var. <i>Butternut</i> | 4.98 | 0.019 | 0.083 | 0.093 | 0.311 | 0.120 | 0.33 |
| Calabaza var. <i>Orange</i> | 8.62 | 0.019 | 0.088 | 0.107 | 0.354 | 0.126 | 0.376 |
| Calabaza var. <i>Muscat de Provence</i> | 6.49 | 0.024 | 0.155 | 0.094 | 0.545 | 0.121 | 0.493 |
| Raíz de remolacha var. <i>Alto</i> | 4.16 | 0.002 | 0.229 | 0.048 | 0.443 | 0.086 | 0.425 |
| Perejil var. <i>Eagle</i> | 22.64 | 0.001 | 0.049 | 0.049 | 0.266 | 0.049 | 0.313 |
| Zanahoria var. <i>Nerac</i> | 3.45 | 0.010 | 0.119 | 0.089 | 0.378 | 0.11 | 0.326 |
| Apio var. <i>Diamant</i> | 11.07 | 0.013 | 0.147 | 0.074 | 0.403 | 0.099 | 0.432 |
| Rábano var. <i>Omny</i> | 3.19 | 0.020 | 0.171 | 0.102 | 0.567 | 0.128 | 0.548 |
| Nabo negro var. <i>Kulata Cerna</i> | 20.62 | 0.027 | 0.059 | 0.074 | 0.453 | 0.129 | 0.432 |
| Manzana var. <i>Champion</i> | 26.75 | 0.001 | 0.085 | 0.088 | 0.367 | 0.071 | 0.445 |

^a Rebanadas cilíndricas (diámetro = 18 mm, espesor = 3.35 mm), $a_w = 0.9830 - 0.9940$; ^b 45 °C, 3 g agente osmótico / g producto durante 90 min; ^c 0.05 g NaCl / g solución; $a_{w, NaCl} = 0.9851$; ^d 40 °Brix; $a_{w, sacarosa} = 0.9808$; $a_{w, jugo} = 0.9449$; ^e GS: ganancia de solutos (g soluto / g producto fresco); ^f PA: pérdida de agua (g agua / g producto fresco).
Adaptada de Lech et al. (2018).

Tabla II. Factores que afectan al proceso de deshidratación osmótica de frutas y hortalizas

| Agente osmótico | | Condiciones de operación | Matriz | Observaciones | Referencias |
|--|---------------------------------|---|--|---|------------------------------|
| Tipo | Concentración | | | | |
| <i>Soluciones con un solo componente</i> | | | | | |
| NaCl | 0.02 - 0.2 g NaCl / g solución | 40 °C, 4 - 20 ml solución / g producto, 1,440 min y 190 rpm | Zanahoria (<i>Amorphophallus</i> spp.) | La disminución de la relación de agente osmótico y matriz alimenticia condujo a una reducción de la pérdida de agua y de la ganancia de solutos (en el equilibrio). | Pacheco-Angulo et al. (2016) |
| | 0.05 - 0.15 g NaCl / g solución | 40 - 60 °C y 150 min | | La concentración de la solución y la temperatura del proceso modifican el transporte de masa. | |
| | | | | | Sangeeta y Hathan (2016) |

Tabla II. Factores que afectan al proceso de deshidratación osmótica de frutas y hortalizas (continuación)

| Agente osmótico | | Condiciones de operación | Matriz | Observaciones | Referencias |
|---|---|--|---|---|---|
| Tipo | Concentración | | | | |
| NaCl | 0.05 - 0.25 g NaCl / mL solución | 30 - 70 °C, 1 ml solución / g producto, 150 min | Calabaza (<i>Cucurbita moschata</i>) | Los principales factores que modificaron el transporte de masa durante este proceso fueron la concentración y temperatura de la solución osmótica y el tiempo de inmersión. | Rahman <i>et al.</i> (2015) |
| | 0.10 y 0.25 g NaCl / g solución | 40 - 80 °C, 15 g producto / g solución, 180 min, 120 rpm | Champiñón blanco (<i>Agaricus bisporus</i>) | La pérdida de agua y ganancia de sólidos influyen en la disminución del volumen del producto. | González-Pérez <i>et al.</i> (2019) |
| Sacarosa | 30 - 50 °Brix | 30 - 50 °C, 20 g solución / g producto, 240 min, 120 rpm | Litchi (<i>Litchi chinensis Sonn</i>) | La concentración de la solución y la temperatura influyen en la velocidad de transferencia de masa. | Bera y Roy (2015) |
| | | 30 - 50 °C, 5 - 15 g solución / g producto, 30 - 180 min | Amla, grosella espinosa india o amalak (<i>Embllica officinalis L.</i>) | Las relaciones de agente osmótico y matriz alimenticia de este experimento no tienen influencia significativa en los parámetros de transferencia de masa. | Tiroutchelvame <i>et al.</i> (2015) |
| | 35 - 65 °Brix | 40 °C, 2 g solución / g producto, 360 min, con agitación | Papaya var. <i>Khaek dam</i> (<i>Carica papaya L.</i>) | La reducción de actividad de agua se incrementó en función del aumento de sacarosa. | Rongtong <i>et al.</i> (2018) |
| | 40 - 70 °Brix | 40 - 70 °C, 20 g solución / g producto, 1,800 rpm | Uchuva (<i>Physalis peruviana L.</i>) | En temperaturas mayores a 55 °C se incrementa la reducción de carotenoides totales (aproximadamente 50 %). | Luchese <i>et al.</i> (2015) |
| <i>Soluciones con más de un componente</i> | | | | | |
| Jarabe de maíz (JM) | 0.44 - 0.56 g JM / g solución | 34 - 46 °C, 10 g solución / g producto, 120 - 210 min | Papaya (<i>Carica papaya L.</i>) | La ganancia de solutos (de la matriz osmodeshidratada) obtenidas en soluciones de JM son inferiores a las de soluciones de sacarosa debido a su alta viscosidad y contenido de polisacáridos. | El-Aouar <i>et al.</i> (2006) |
| Soluciones de NaCl y sacarosa | A) 5 % NaCl y 50 % sacarosa / mL solución B) 15 % NaCl y 50 % sacarosa / mL solución | 5 - 50 °C, 20 g solución / g producto, 60 - 180 min | Calabazas (<i>Cucurbita spp.</i>) | La velocidad de transferencia de masa se ve influenciada en mayor medida por la concentración de NaCl. | Mokhtarian <i>et al.</i> (2014) |
| Soluciones de NaCl (PM = 58.44 g / mol), KCl (PM = 74.55g / mol) y CaCl ₂ (PM = 110.93g / mol) | A) 10 % NaCl B) 7.5 % NaCl y 25 % KCl C) 7.0 % NaCl, 2.5 % KCl y 0.5 % CaCl ₂ D) 5% NaCl, 4% KCl y 1% CaCl ₂ | 30 °C, 10 g solución / g producto y 120 min | Berenjena (<i>Solanum melongena L.</i>) | Los experimentos con 10 % NaCl ($a_w = 0.9450$) alcanzaron una mayor pérdida de agua (7 - 16 %) respecto a las que tienen sustitutos de NaCl. Las muestras con CaCl ₂ , presentaron una ganancia de solutos más alta (21 %) respecto a las que no tienen CaCl ₂ . | De Jesus Junqueira <i>et al.</i> (2017) |

Tabla II. Factores que afectan al proceso de deshidratación osmótica de frutas y hortalizas (continuación)

| Agente osmótico | | Condiciones de operación | Matriz | Observaciones | Referencias |
|--|---|---|--|---|---|
| Tipo | Concentración | | | | |
| Soluciones de glicerol (PM = 92.09 g / mol), sorbitol (PM = 182.17 g / mol) y lactato de calcio en soluciones de 30 - 70 % de sorbitol o glicerol | A) 30, 50 y 70 % de glicerol o sorbitol B) 30, 50 y 70 % de glicerol o sorbitol adicionado con 20 g lactato de calcio / L solución | 30 °C, 20 g solución / g producto, 720 min y 1,000 rpm | Yacón (<i>Smallanthus sonchifolius</i>) | A) El sorbitol tuvo una menor permeabilidad en la matriz alimenticia debido a su peso molecular. El glicerol se usa para mejorar textura (plasticante); el sorbitol se usa como edulcorante. B) El lactato de calcio ayudó a prevenir el colapso celular. | Brochier <i>et al.</i> (2015) |
| Soluciones de sacarosa (PM = 342.30 g / mol), inulina (PM = 6,178.02 g / mol), sacarosa-inulina, sacarosa-jugo concentrado de chokeberry (JCC) (1 : 1) e inulina-JCC (4 : 1) | 50 °Brix | 30 y 50 °C, 2 g solución / g producto, 360 min, con agitación | Fresa var. <i>Honeoye</i> | La sustitución parcial de sacarosa (con JCC o inulina) permite obtener productos con menor humedad, mayor valor nutricional (menos azúcar simple) y enriquecidos con compuestos bioactivos. Debido a su peso molecular, se obtiene una menor transferencia de masa con inulina. | Kowalska <i>et al.</i> (2017) |
| Soluciones de glicerol (PM = 92.09 g / mol), eritritol (PM = 122.12 Da), glicósidos de esteviol (PM = 318.45 g / mol) y Citrox | 40 - 60 % glicerol, 12.5 % eritritol, 1.25 % glicósidos de esteviol y 0.2 % Citrox | 25 - 45 °C, 5 g solución / g producto, 240 min | Durazno | El glicerol permitió reducir la aw; el eritriol y los glicósidos de esteviol sirvieron como endulzante, y el Citrox como antimicrobiano. La velocidad de transferencia de masa se vio favorecida por el incremento de la temperatura y la concentración de glicerol. | Dermeslonlouoglou y Giannakourou (2019) |
| Soluciones de sacarosa, miel y miel-sacarosa (1 : 1) | A) 60 - 80 °Brix B) 74 °Brix | 30 y 50 °C, 7 g solución / g producto, 210 min | Piña (<i>Ananas comosus L.</i>) | Las soluciones de sacarosa y miel-sacarosa registraron una mayor pérdida de agua que los productos tratados con soluciones de miel. Las muestras osmodeshidratadas con la solución miel-sacarosa tuvieron una mejor aceptación sensorial. | Sethi y Kaur (2019) |
| <i>Jugos concentrados</i> | | | | | |
| Manzana (JCM) | 40 °Brix | 40 °C, 2 g solución / g producto, 120 min | Cereza agria var. <i>Turgieniewka</i> (<i>Prunus cerasus L.</i>) | El producto osmodeshidratado incrementó un 16 % el contenido de polifenoles y un 35 % la actividad antioxidante respecto al producto fresco. | Nowicka <i>et al.</i> (2015) |
| JCC (<i>Aronia melanocarpa</i>) | 40 °Brix | 50 °C, 3 ml solución / g producto, 120 min | Remolacha var. <i>Alto F1</i> | La aplicación de JCC durante la etapa de deshidratación osmótica podría mejorar la funcionalidad y el color de los productos secos, al transferir compuestos bioactivos y organolépticos activos a la matriz alimenticia. | Lech <i>et al.</i> (2015) |

Tabla II. Factores que afectan al proceso de deshidratación osmótica de frutas y hortalizas (continuación)

| Agente osmótico | | Condiciones de operación | Matriz | Observaciones | Referencias |
|---|---------------|--|---|---|-----------------------------|
| Tipo | Concentración | | | | |
| JCC (<i>Aronia melanocarpa</i>) | 40 °Brix | 45 °C, 3 ml / g producto, 120 min | Chokeberry negro (<i>Aronia melanocarpa</i>) | Los productos secos pretratados por osmodeshidratación mostraron un incremento de porosidad y una reducción de amargura en comparación con las muestras sin tratamiento. | Calín-Sánchez et al. (2015) |
| | | 45 °C, 2 ml solución / g de producto, 90 min | Arilos de granada var. <i>Mollar de Elche</i> (<i>Punica granatum L.</i>) | El uso de JCC durante la deshidratación osmótica mejora la aceptación sensorial (parámetros de apariencia y homogeneidad del color) en comparación con las muestras sin tratamiento. | Cano-Lamadrid et al. (2017) |
| | 60 °Brix | 40 y 60 °C, 4 g solución / g producto, 120 min, 60 rpm | Manzana var. <i>Braeburn</i> | El color de las muestras osmodeshidratadas con JCC es más estable ($p < 0.05$) que muestras osmodeshidratadas con sacarosa (a las mismas condiciones) durante 12 meses de almacenamiento. | Cichowska y Kowalska (2018) |
| | 65 °Brix | 45 °C, 4 g solución / g producto, 1,440 min, 60 rpm | Manzana var. <i>Gala</i> | El uso de JCC durante la deshidratación osmótica de manzana mejora la aceptación sensorial (parámetros de color y sabor) en comparación con el producto osmodeshidratado con soluciones de sacarosa a las mismas condiciones. | Samborska et al. (2019) |
| Granada var. Wonderful (GW); GW-JCC (1 : 1, v / v); GW-JCM (1 : 1, v / v); JCM-JCC (1 : 1, v / v); JCM-JCC (3 : 1, v / v) | 40 °Brix | 45 °C, 2 mL solución / g producto, 90 min | Arilos de granada var. <i>Mollar de Elche</i> (<i>Punica granatum L.</i>) | Las soluciones permitieron obtener arilos osmodeshidratados con el mismo contenido de humedad. El uso de GW y GW-JCC mejoró la ganancia de solutos, incrementando el contenido de antocianinas totales. | Cano-Lamadrid et al. (2017) |
| Grosella negra (JCGN); cereza ácida (JCCA); frambuesa (JCF); membrillo (JCMB); flor de membrillo (JCFMB); JCM; JCC | 40 °Brix | 40 °C, 2 ml / g de producto, 90 min | Cereza (<i>Prunus cerasus L.</i>) | Las soluciones de JCCA y JCC enriquecieron 6.4 - 22.4 % de polifenoles; la de JCC aumentó hasta 1.5 la cantidad de procianidinas poliméricas y la de JCGN redujo el 10.14 % de antocianinas de la matriz alimenticia. | Nowicka et al. (2015) |

2.1. Factores relacionados con la matriz alimenticia

Durante la osmodeshidratación de frutas y hortalizas, la composición química y algunas propiedades físicas de la matriz alimenticia influyen en las cinéticas de transferencia de masa. En el caso de la composición química de la matriz alimenticia, algunos estudios indican que la variedad y el grado de madurez pueden afectar la velocidad del proceso debido al tipo y concentración de los compuestos presentes en el producto (Ahmed *et al.*, 2016; Sulistyawati *et al.*, 2018). Mavroudis, Dejmek y Sjöholm (2004) compararon la ganancia de agua y pérdida de solutos durante la osmodeshidratación (50 °Brix de sacarosa a 5-40 °C) de diferentes variedades de manzana –específicamente Kim, Mutsu y Jonagold. Los autores encontraron que la transferencia de masa durante el proceso no tuvo el mismo comportamiento para todas estas variedades de manzana. Las variedades Kim y Jonagold registraron una mayor pérdida de agua (0.20-0.45 g agua/g producto) en relación con la ganancia de solutos (0.10-0.12 g soluto/g producto). En el caso de la variedad Mutsu, el proceso redujo muy poco su humedad, pero logró una mayor ganancia de sólidos, lo que permitió tener un producto adecuado para confitería. Por su parte, Sulistyawati *et al.* (2018), osmodeshidrataron (60 °Brix de sacarosa a 60 °C) mangos de la variedad Keny con diferente grado de madurez (inmaduros, 13.2 °Brix y maduros, 15.7 °Brix). Encontraron que el mango inmaduro mostró una ganancia de sólidos 2-5 veces mayor que los maduros.

Las cinéticas de proceso también pueden verse afectadas por las propiedades físicas de la matriz alimenticia, como la piel, porosidad, tamaño, forma, entre otros (Chandra y Kumari, 2015; Deng *et al.*, 2019). Se ha observado que la piel de frutas y hortalizas ejerce una resistencia a la transferencia de masa (Ketata *et al.*, 2013; Alfaro *et al.*, 2018). A pesar de que esta resistencia se puede reducir removiendo la piel o cortando el producto (Gómez-Ramírez *et al.*, 2013), la calidad (textura, color característico, entre otros atributos) de algunos productos puede modificarse al remover la piel. Por ello, la matriz alimenticia se somete a tratamientos que permiten incrementar la permeabilidad de la piel (Allahdad *et al.*, 2019). Alfaro *et al.* (2018), modificaron la permeabilidad de la piel de *Vaccinium angustifolium* Ait., sumergiéndolo en nitrógeno líquido (-196 °C, durante 10 segundos). Este tratamiento permitió que durante el proceso de deshidratación osmótica (60 °Brix de sacarosa a 40 °C por 8 horas) se alcanzara una reducción de humedad de un 20 % y un incremento de solutos del 23 %, con relación al mismo producto sin pretratamiento.

En la tabla I, se muestra cómo la porosidad de la matriz alimenticia afecta la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica en diferentes agentes osmóticos. Lech, Michalska, Wojdylo, Nowicka, y Figiel (2018) encontraron que la porosidad de la matriz alimenticia podría tener un impacto en la deshidratación osmótica. Entre más pequeña es la porosidad, más espacio disponible tiene la matriz alimenticia para la transferencia de masa, lo que implica una mayor pérdida de agua y ganancia de solutos (como el rábano var. *Omny* y la zanahoria var. *Nerac*), en comparación con las que tienen una mayor porosidad (manzana var. *Champion*).

Asimismo, Ruiz-López, Huerta-Mora, Vivar-Vera, Martínez-Sánchez y Herman-Lara (2010) compararon las características de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica (0.10 y 0.25 g NaCl/g solución, 4 g solución/g producto a 25 °C durante 3 horas) de prismas de chayote con diferentes dimensiones (1×1×2 y 1×1×4 cm). Los autores encontraron que las muestras con dimensiones más pequeñas alcanzaban rápidamente el estado de equilibrio. Finalmente, se concluyó que el tiempo de proceso fue proporcional a la longitud característica de la matriz alimenticia. González-Pérez *et al.* (2019) analizaron los cambios de la velocidad de transferencia de masa ocasionados por el encojimiento y deformación de la matriz alimenticia durante el proceso de osmodeshidratación (0.10 y 0.25 g NaCl/g solución, 15 g solución/g producto, 40, 60 y 80 °C) de píleos de champiñón blanco. Los autores hallaron que, si se considera que el volumen del producto permanece constante durante el proceso de osmodeshidratación, se genera una sobreestimación del 39-113 % en los parámetros correspondientes a la pérdida de agua y del 24-66 % para los relacionados con la ganancia de solutos.

2.2. Agente osmótico

La naturaleza del agente osmótico (solución osmótica) es un factor importante en el desarrollo de frutas y hortalizas osmodeshidratadas (Akharume *et al.*, 2019). El tipo de agente osmótico y su concentración influyen en la presión osmótica (tablas I y II). Esta presión es la única fuerza impulsora para la transferencia de masa durante la osmodeshidratación de alimentos, por lo que la rapidez del proceso dependerá, en mayor medida, de las características de este parámetro (Cheng *et al.*, 2014).

2.2.1. Tipos de agente osmótico

Las características del agente osmótico que deben ser consideradas en el proceso de deshidratación osmótica son la actividad de agua, el peso molecular y la solubilidad o el estado iónico de las

especies químicas presentes en la solución (Lech *et al.*, 2017). La actividad de agua (a_w) es la propiedad fisicoquímica más importante del agente osmótico durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas (Lech *et al.*, 2017). Entre más grande es la diferencia de la a_w del agente osmótico y la de la matriz alimenticia, mayor es la fuerza impulsora para la transferencia de masa. En la tabla I se presentan algunos ejemplos relacionados con la influencia de la a_w en la transferencia de masa de diferentes frutas y hortalizas con $a_w = 0.9830 - 0.9940$. El jugo concentrado de *chokeberry* ($a_w = 0.9449$) permitió obtener mayores pérdidas de agua y ganancias de solutos, a diferencia de las alcanzadas con la solución de NaCl ($a_w = 0.9851$). Esto se atribuye a que la diferencia entre la a_w del jugo concentrado de *chokeberry* y la a_w de la matriz alimenticia fresca es mayor que la de la de soluciones de NaCl. Por otro lado, un agente osmótico con menor peso molecular puede penetrar fácilmente en las células de las frutas y verduras, en comparación con el agente osmótico de mayor peso molecular (Brochier *et al.*, 2015).

El tipo de solución osmótica utilizada depende principalmente de la compatibilidad con la matriz sometida al proceso osmótico. Generalmente, se emplea NaCl para vegetales, carnes rojas, pescado, camarón, entre otros. Mientras que para la osmohidratación de frutas y hortalizas se utilizan sacarosa, edulcorantes o concentrados de frutas u hortalizas (Lech *et al.*, 2018). La influencia de varios agentes osmóticos se muestra en la tabla II.

2.2.2. Concentración de la solución osmótica

La concentración de la solución juega un papel importante en la velocidad de transferencia de masa. Algunos estudios indican que un aumento en la concentración de solutos da como resultado mayor pérdida de agua y ganancia de sólidos (Shete *et al.*, 2018). Este comportamiento se ha visto principalmente en soluciones de NaCl y sacarosa (Bera y Roy, 2015; Sangeeta y Hathān, 2016; Rongtong *et al.*, 2018; González-Pérez *et al.*, 2019). Para las soluciones osmóticas con más de un componente, la velocidad de transferencia se modifica principalmente por la concentración del compuesto con menor peso molecular, como se indica en algunos estudios de la tabla II (Mokhtarian *et al.*, 2014; De Jesus Junqueira *et al.*, 2017; Dermesolouoglou y Giannakourou, 2019).

2.3. Condiciones de proceso

La influencia de las condiciones de proceso de deshidratación osmótica ha sido estudiada en los últimos años (Lech *et al.*, 2018). En la literatura encontramos diversos estudios sobre cómo las varia-

ciones en temperatura, la relación de agente osmótico y la matriz alimenticia, el tiempo de inmersión y la agitación del sistema osmótico afectan la transferencia de masa (tabla II).

2.3.1. Temperatura de la solución osmótica

Algunas investigaciones encontraron que el incremento de la temperatura de la solución osmótica favorece la ganancia de solutos, ya que, a medida que la temperatura se eleva, también lo hace la solubilidad de los solutos en el líquido (Salim *et al.*, 2016); lo que modifica la viscosidad del medio osmótico (El-Aouar *et al.*, 2006). Asimismo, el incremento térmico del sistema puede acelerar en mayor porcentaje la pérdida de agua (Sangeeta y Hathān, 2016; Dermesolouoglou y Giannakourou, 2019). Sin embargo, el proceso no debe exceder los 60 °C, ya que estas temperaturas pueden dañar los tejidos vegetales, favoreciendo al colapso de la matriz alimenticia (Ramya y Jain, 2017), o incrementar la pérdida de compuestos como los carotenoides (Luchese *et al.*, 2015).

2.3.2. Relación del agente osmótico y matriz alimenticia

La relación entre el peso (o volumen) del agente osmótico y el peso de la muestra es de gran importancia durante el tratamiento osmótico de frutas y hortalizas. Puede afectar a la cinética de transferencia de masa, ya que el agua que pide el alimento durante el proceso disminuye la concentración de la solución osmótica (Ahmed *et al.*, 2016). Se recomienda una relación de producto y solución osmótica de al menos 1 : 15 cuando se trabaja con soluciones de NaCl, o de 1 : 20 1 : 3 para soluciones de sacarosa. Sin embargo, la elección de esta relación dependerá de la concentración que alcanzará la solución osmótica, considerando la dilución generada por el agua que el producto pierde durante el proceso (Tiroutchelvame *et al.*, 2015; Pacheco-Angulo *et al.*, 2016; Shete *et al.*, 2018).

2.3.3. Tiempo de inmersión

El aumento del tiempo de inmersión provoca una mayor transferencia de masa. Al comienzo del proceso de deshidratación osmótica los fenómenos de transferencia de masa son rápidos, conforme la solución osmótica gana agua, la diferencia entre las presiones se reduce, lo que resulta en una velocidad de transferencia de masa más baja, hasta alcanzar un estado de equilibrio másico (Ahmed *et al.*, 2016). De manera simultánea, el tejido del producto puede sufrir una contracción a lo largo del proceso de deshidratación, reduciendo el espacio para llevar a cabo la transferencia de masa (Ramya y Jain, 2017).

2.3.4. Agitación

El agua eliminada del producto osmodeshidratado puede diluir la solución osmótica a los alrededores del producto osmodeshidratado (Assis *et al.*, 2016). El uso de agitación durante el proceso de deshidratación osmótica homogeneiza el contacto entre el producto y la solución osmótica, disminuyendo el tiempo de transferencia de masa. Por lo general, para soluciones con solutos de bajo peso molecular, como NaCl, se utilizan velocidades de agitación de 120-190 rpm; esta velocidad también se ha usado para soluciones de 30-50 °Brix de sacarosa (Bera y Roy, 2015; Tiroutchelvame *et al.*, 2015). Cuando el agente osmótico es más viscoso (soluciones de sacarosa, sorbitol o glicerol con concentraciones mayores a 60 °Brix) las velocidades de agitación son de 1,000-1,800 rpm (Brochier *et al.*, 2015; Luchese *et al.*, 2015).

3. Métodos no térmicos aplicados en la osmodeshidratación para modificar la transferencia de masa

Como se presentó en secciones anteriores, la única fuerza impulsora para la transferencia de masa durante la osmodeshidratación es la presión osmótica. Esta fuerza impulsora requiere mucho tiempo para alcanzar un estado de equilibrio osmótico, a menos que se incremente la permeabilidad de la membrana celular (Deng y Zhao, 2008; Cheng *et al.*, 2014). La membrana celular de frutas y hortalizas ejerce una resistencia a la transferencia de masa. Si se consigue dañar la membrana celular con métodos no térmicos, se puede mejorar la eficiencia del proceso y la calidad de producto (Ahmed *et al.*, 2016). Se han estudiado una serie de métodos no térmicos en combinación con la deshidratación osmótica para mejorar la eficiencia del proceso y la calidad del producto final. Estas técnicas incluyen tratamiento con altas presiones hidrostáticas, con pulsos de vacío, pulsos eléctricos, ultrasonido y osmo-sonicación (Ramya y Jain, 2017; Feng *et al.*, 2019).

3.1. Altas presiones hidrostáticas

El tratamiento de alimentos con altas presiones hidrostáticas (HHP) implica la aplicación de presión hidrostática (50-1,000 MPa) sobre un producto (Witrowa-Rajchert *et al.*, 2014). La

combinación de HHP con deshidratación osmótica (DO-HHP) consiste en colocar la matriz alimenticia en bolsas de polietileno con 3-20 g de solución osmótica/g de producto y sellar al vacío (George *et al.*, 2016; Luo *et al.*, 2018). Posteriormente, esta bolsa se coloca en un sistema cerrado que contiene al medio de transmisión de la presión (agua destilada o 30 % de propilenglicol) (Verma *et al.*, 2014; Dermesonlouoglou *et al.*, 2019), este medio va a ejercer presión por compresión física mediante reducción mecánica de volumen (figura 2). Cuando frutas y hortalizas se tratan previamente con HHP, la membrana celular se permeabiliza, lo que facilita la difusión y proporciona mayores tasas de deshidratación (Deng *et al.*, 2019).

En la tabla III se muestran ejemplos de la aplicación de HHP para asistir la deshidratación osmótica de frutas. Algunos investigadores usaron las HHP para incrementar la pérdida de agua a través de la ruptura de la pared celular (Verma *et al.*, 2014; Sulistyawati *et al.*, 2018). Sin embargo, la modificación de la pared celular no siempre influye en la transferencia de masa (Núñez-Mancilla *et al.*, 2013, 2014; Dermesonlouoglou *et al.*, 2019). Núñez-Mancilla *et al.* (2013), analizaron tratamientos de *Fragaria vesca* en soluciones a 40 °Brix de sacarosa con DO-HHP, sin encontrar diferencias significativas en los parámetros de transferencia de masa en presiones hidrostáticas mayores a 400 MPa. Dermesonlouoglou *et al.* (2019) hallaron que las modificaciones a la pared celular de duraznos y albaricoques, debido al tratamiento de HHP (100 MPa) con deshidratación osmótica, afectaban principalmente a la dureza del producto final. Por otro lado, también se observa que la deshidratación osmótica asistida con HHP influye en la composición nutricional y las características de calidad del producto; se ha demostrado la inhibición de microorganismos, lo cual incrementa la vida útil en comparación con las muestras osmodeshidratadas convencionalmente (Dermesonlouoglou *et al.*, 2016, 2017). No obstante, el incremento de HHP puede tener un impacto negativo en el color, pues en el tratamiento de fresa con HHP a 300-500 MPa se generó un mayor oscurecimiento del producto osmodeshidratado, en comparación con las tratadas a 200-300 MPa (Núñez-Mancilla *et al.*, 2013).

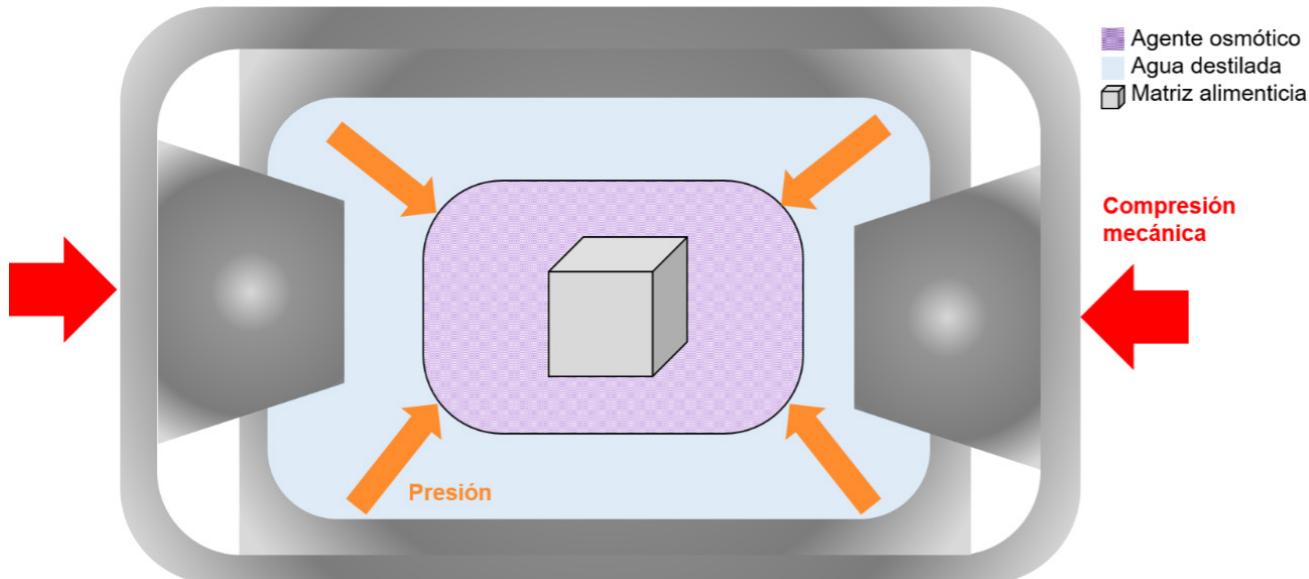
Tabla III. Aplicaciones del proceso de deshidratación osmótica asistido por altas presiones

| Matriz | Variables de proceso | Condiciones de deshidratación osmótica | Conclusiones ^a | Referencias |
|---|--|--|--|--------------------------------|
| Durazno (<i>Prunus persica</i> L.) y albaricoque (<i>Prunus armeniaca</i> L.) | 600 MPa; velocidad de la rampa de 600 MPa / min; temperatura: 25 °C; tiempo de tratamiento: 5 min | 50 % glicerol (p / p), 12.5 % eritritol (p / p), 3.5 % NaCl (p / p), 1.5 % CaCl ₂ (p / p), 1.25 % glucósidos de esteviol (p / p) y 0.2 % Citrox (p / p); 5 g solución osmótica / g producto; 45 °C; 45 min | El uso de HHP incrementó la dureza de los duraznos y albaricoques osmodeshidratados. | Dermesonlouoglou et al. (2019) |
| Fresa var. Camarosa (<i>Fragaria Vesca</i>) | 100, 200, 300, 400 y 500 MPa; velocidad de rampa de 1,020 MPa / min; temperatura: 15 °C; tiempo de tratamiento: 10 min; tiempo de descompresión: 5 s | 40 °Brix de sacarosa, 4 g solución osmótica / g producto | Los polisacáridos aumentaron con la presión. La alta presión provoca ondulación de la pared celular, lo que a su vez afecta las propiedades de textura debido a la pérdida de turgencia celular, firmeza e integridad de la pared celular. | Núñez-Mancilla et al. (2014) |
| | 100, 200, 300, 400 y 500 MPa; velocidad de rampa de 1,020 MPa / min; temperatura: 15 °C; tiempo de tratamiento: 10 min; tiempo de descompresión: 5 s | 40 °Brix de sacarosa, 4 g solución osmótica / g producto | El contenido fenólico total aumentó con el incremento en la presión. El contenido de vitamina C no mostró cambios con el aumento de la presión. Despues de 400 MPa no se observaron incrementos en la transferencia de masa. | Núñez-Mancilla et al. (2013) |
| | 600 MPa; velocidad de la rampa de 600 MPa / min; temperatura: 25 °C; tiempo de tratamiento: 5 min | 50 % glicerol (p / p), 12.5 % eritritol (p / p), 1 % glucósidos de esteviol (p / p), 0.2 % ácido ascórbico (p / p), 1.5 % CaCl ₂ (p / p), 1 % ácido cítrico (p / p), 0.20 % L-cisteína HCl (p / p) y 0.1 % Citrox (p / p); 5 g de solución osmótica / g producto; 15 - 45 °C, 240 min | El tratamiento no modificó los parámetros de transferencia de masa. La vida útil se prolongó significativamente tanto para DO-HHP como para DO (hasta 10 y 4 meses a 5 °C, respectivamente). | Dermesonlouoglou et al. (2016) |
| Jitomate var. Heinz 3402 | 600 MPa; velocidad de la rampa de 600 MPa / min; temperatura: 25 °C; tiempo de tratamiento: 5 min | 50 % glicerol (p / p), 12.5 % eritritol (p / p), 3.5 % NaCl (p / p), 1.5 % CaCl ₂ (p / p) y 0.2 % Citrox (p / p); 5 g solución osmótica / g producto; 35 °C, 90 min | La vida útil de las muestras DO y DO-HHP se estimó en 77 y 181 días, respectivamente, a 5 °C. | Dermesonlouoglou et al. (2017) |

Tabla III. Aplicaciones del proceso de deshidratación osmótica asistido por altas presiones (continuación)

| Matriz | Variables de proceso | Condiciones de deshidratación osmótica | Conclusiones ^a | Referencias |
|---|--|--|--|-----------------------------------|
| Mango (<i>Mangifera indica L.</i>) maduro e inmaduro | 300 MPa; velocidad de la rampa de 402 MPa / min; temperatura: 50 °C; tiempo de tratamiento: 3 - 5 min; tiempo de descompresión: 10 s | 60 °Brix de sacarosa, 2 % lactato de calcio (p / p) o 0.0048 % PME ^b (ml / g), 4 g solución osmótica / g producto, 30 - 240 min | Resultó favorable usar mango inmaduro y aplicar DO-HHP sin PME para obtener una ganancia de solutos alta y una pérdida de agua baja (mango confitado). | Sulistyawati <i>et al.</i> (2018) |
| Plátano (<i>Musa cavendishii</i>) | 200 MPa; velocidad de la rampa de 200 MPa / min; temperatura: 25 °C; tiempo de tratamiento: 5 min; tiempo de descompresión: 10 s | 30 - 70 °Brix de sacarosa, 5 g solución osmótica / g producto, 30 - 70 °C, 480 min, 120 rpm | Se registró una mayor pérdida de agua (22 %) y ganancia de solutos (50.5 %) en comparación con las muestras sin tratar, esto se atribuyó a la ruptura de la pared celular por la presión aplicada. | Verma <i>et al.</i> (2014) |

^a HHP: Altas presiones hidrostáticas; DO: deshidratación osmótica; DO-HHP: deshidratación osmótica asistida con altas presiones hidrostáticas; ^b PME: pectinmetilesterasa.

**Figura 2.**

Representación esquemática de la reducción mecánica de volumen para generar altas presiones.

3.2. Pulsos de vacío

La deshidratación osmótica asistida con vacío (DO-PV) consiste en la aplicación de presión de vacío a un sistema sólido-líquido, seguido de la restauración de la presión atmosférica. Durante la aplicación del vacío, el gas o líquido contenido en los poros del producto se elimina. Cuando se restablece la presión atmosférica, la solución externa penetra en el espacio poroso del alimento (Sulistyawati *et al.*, 2018). Esto implica un aumento de la superficie de contacto sólido líquido y, por ende, un incremento de la transferencia de masa (Ahmed *et al.*, 2016).

En la tabla IV se muestran algunas aplicaciones del proceso de DO-PV. La mayoría de estos estudios se han aplicado a frutas y hortalizas sumergidas en soluciones osmóticas de sacarosa (30-70 °Brix); las presiones de vacío van de 0.0099 a 0.0253 MPa, y los tiempos de aplicación del vacío oscilan en-

tre los 2 y los 20 minutos. Estos estudios demostraron que el incremento de la presión de vacío durante la DO-PV ayuda a obtener productos con menor contenido de agua y menor ganancia de solutos (Şahin y Öztürk, 2018). Asimismo, la velocidad de transferencia de masa se ve afectada por la porosidad de la matriz alimenticia (Mújica-Paz *et al.*, 2003). Además, la DO-PV puede mejorar la composición nutricional o la calidad del producto osmodeshidratado, ya que algunos estudios han encontrado que permite impregnar probióticos en manzana mediante el incremento de solutos presentes en soluciones de sacarosa y emulsiones ($W_1/O/W_2$) formadas con *Lactobacillus rhamnosus* LC70/aceite de semillas de uva/proteína de suero de leche (Flores- Andrade *et al.*, 2017). También puede mejorar el color, la textura y el sabor de alimentos secos (Ramya y Jain, 2017; An *et al.*, 2019).

Tabla IV. Aplicaciones del proceso de deshidratación osmótica asistido por pulsos de vacío

| Matriz | Variables de proceso | | Condiciones de deshidratación osmótica | Conclusiones ^a | Referencias |
|------------------------------------|---|--------|--|--|-----------------------------------|
| | Presión de vacío | Tiempo | | | |
| Higos (<i>Ficus carica</i> L.) | 0.99×10^{-2} MPa (74 mmHg) | 5 min | 40 - 60 °Brix de sacarosa, 40 °C, 10 g solución osmótica / g producto, 240 min | El aumento de la concentración de sacarosa incrementó la pérdida de agua y la ganancia de solutos. | De Mello <i>et al.</i> (2019) |
| | 1.31×10^{-2} MPa (98 mmHg), 15 min | 15 min | 50 °Brix de sacarosa, 50 °C, 4 g solución osmótica / g producto, 165 min | El uso de deshidratación osmótica asistida por PV acortó el periodo de secado, en tanto favoreció la eliminación de agua y resultó en una menor ganancia de solutos. | Şahin y Öztürk (2016) |
| | 2.53×10^{-2} MPa (190 mmHg) | 15 min | 50 °Brix de sacarosa, 50 °C, 4 g solución osmótica / g producto, 180 min | La deshidratación osmótica asistida por PV redujo el tiempo de secado, sin embargo, las muestras tratadas con este proceso se encogieron más (3 %) que las muestras sin tratamiento. | Şahin y Öztürk (2018) |
| Manzana var. <i>Ligol</i> | 0.008, 0.0067 y 0.080 MPa (60, 502.5 y 600 mmHg) | 2 min | 30, 50 y 70 °Brix de sacarosa, 5 g solución osmótica / g producto, 25 °C, 180 min | A mayor presión de vacío, se registró una menor ganancia de sólidos. | Muszyński <i>et al.</i> (2016) |

Tabla IV. Aplicaciones del proceso de deshidratación osmótica asistido por pulsos de vacío (continuación)

| Matriz | Variables de proceso | | Condiciones de deshidratación osmótica | Conclusiones ^a | Referencias |
|--|--|------------|--|---|-------------------------------------|
| | Presión de vacío | Tiempo | | | |
| Manzana var. <i>Granny Smith</i> | 0.0114 MPa (85.4 mmHg) | 20 min | 9 g de sacarosa / g de emulsión W1 / O / W2 (emulsión agua en aceite, W1 / O se formó con la 9.98×10^8 UFC de <i>Lactobacillus rhamnosus</i> LC705 / ml y 62 g aceite de semilla de uva; finalmente 30 g de la emulsión W1 / O se dispersó en 70 g de solución de 14 % de concentrado de proteína de suero de leche); 40 - 60 °Brix; 20 g solución osmótica / g producto; 320 min | Se promovió una mayor incorporación de probióticos cuando la ganancia de sólidos aumenta con el tiempo. Asimismo, la deshidratación osmótica asistida con PV produce una mayor impregnación de <i>Lactobacillus rhamnosus</i> respecto al proceso a presión atmosférica (7.52×10^7 - 1.75×10^8 UFC / g). | Flores-Andrade <i>et al.</i> (2017) |
| Jengibre chino (<i>Zingiber officinale Roscoe</i>) | 0.013 MPa (97.5 mmHg) | 15 min | 0.50 g sacarosa y 0.10 g NaCl / g solución, 4 g solución / g producto, 30 °C, 30 min | La deshidratación osmótica asistida con pulsos de vacío permite reducir más de un 80 % la actividad de polifenol oxidasa e incrementa (80 %) la actividad de peroxidasa. | An <i>et al.</i> (2019) |
| Manzana, mango, melón | 0.0135 - 0.067 MPa (101.25 - 505.5 mmHg) | 10 min | 40 - 60 °Brix de sacarosa, 10 g solución osmótica / g producto, 25 °C, 20 min | La velocidad de transferencia de masa es favorecida en frutas con altos niveles de porosidad (manzana). | Mújica-Paz <i>et al.</i> (2003) |
| Manzana (<i>Malus pumila Mill</i>) | 0.02 MPa (150 mmHg) | 5 y 10 min | 30 - 60 °Brix de sacarosa, 10 - 55 °C, 10 g solución osmótica / g producto, 240 min | Las muestras sin presión de vacío tuvieron mayor ganancia de solutos. | Wang <i>et al.</i> (2018) |

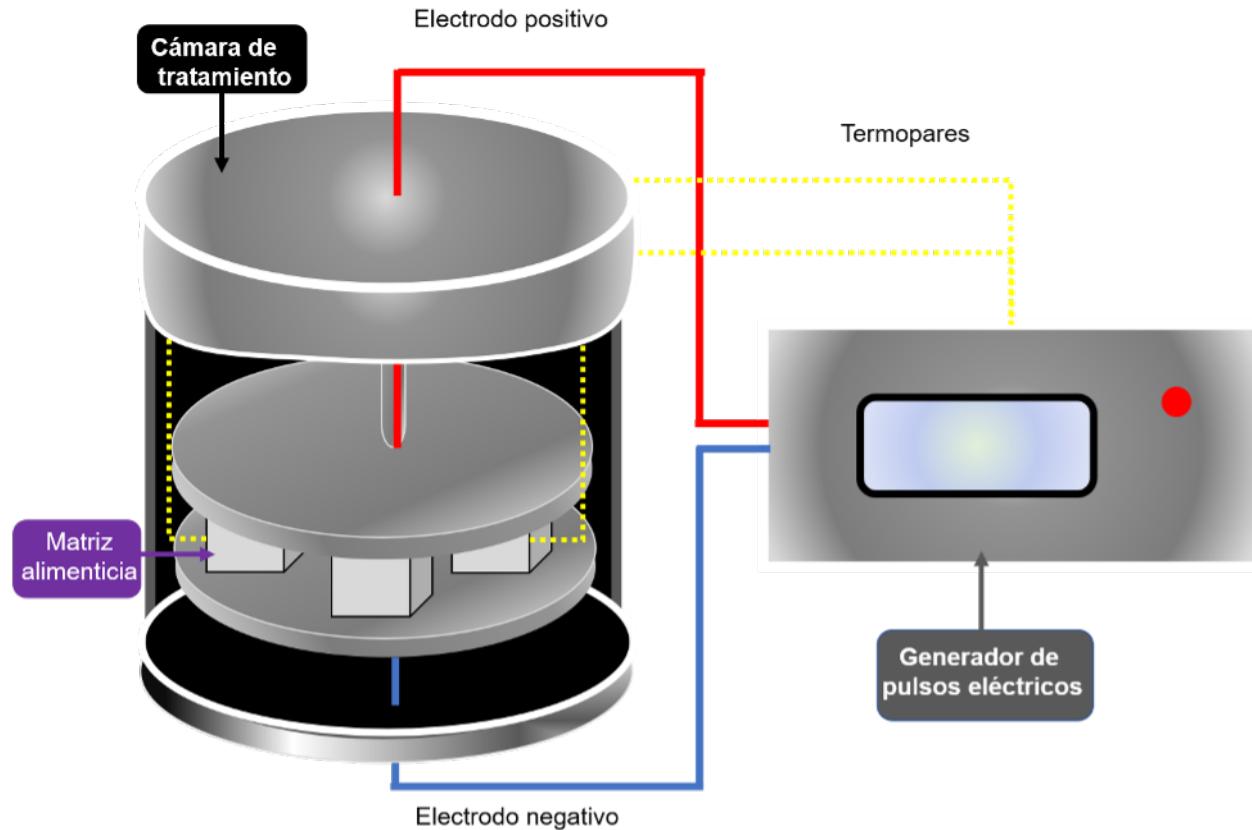
^a PV: pulsos de vacío; UFC: unidades formadoras de colonia.

3.3. Pulsos eléctricos

El tratamiento por campo eléctrico consiste en la aplicación de corriente eléctrica a través de un material alimenticio (figura 3) (Simpson *et al.*, 2015). Este tratamiento puede causar cambios en la permeabilidad de la membrana celular –conformada por una bicapa de fosfolípidos– de frutas y hortalizas, debido a una electroporación o a electrocompresión (Kusnadi y Sastry, 2012). La electroporación se produce cuando el campo eléctrico externo induce cambios conformatacionales y una reorganización de

la bicapa fosfolipídica generando poros (Traffano-Schiffó *et al.*, 2016). Mientras que la electrocompresión se produce debido a la acumulación de cargas (electrolitos) en ambos lados de la membrana celular, las cuales se atraen entre sí hasta generar un poro (Traffano-Schiffó *et al.*, 2017).

El incremento de la permeabilidad de la membrana celular de frutas y hortalizas generado por la aplicación de corriente eléctrica, puede ser causado mediante campos eléctricos pulsados (PEF), campos eléctricos pulsados de intensidad mode-

**Figura 3.**

Representación esquemática del sistema de tratamiento de alimentos sólidos con pulsos eléctricos. Adaptada de Parniakov *et al.* (2016).

rada (MEF) y campos eléctricos pulsado de alta intensidad (HELP) (Yildiz *et al.*, 2016). El método más estudiado es el de PEF (Dermesonlouoglou *et al.*, 2018), en la figura 3 se muestra un esquema representativo (Parniakov *et al.*, 2016; Wu *et al.*, 2020). El método consiste en la aplicación de PEF a través de un material situado entre dos electrodos durante períodos de tiempo muy cortos (de microsegundos a milisegundos) (Traffano-Schiffó *et al.*, 2017). Los electrodos pueden estar en contacto directo con el alimento sólido (a través de placas metálicas o de alambres) o con una solución electrolítica (NaCl) colocada en la cámara de tratamiento, esta solución permitirá una mayor superficie de contacto de la corriente eléctrica con el alimento sólido (Tylewicz *et al.*, 2017).

Las modificaciones en la permeabilidad de la membrana celular ocasionadas por PEF han sido de gran ayuda para

mejorar procesos de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de alimentos (Dellarosa *et al.*, 2016). En la tabla V se muestran algunos estudios de la aplicación de PEF en frutas y hortalizas; estos demuestran que el uso de PEF como tratamiento previo a la deshidratación osmótica mejora la velocidad de transferencia de masa. Específicamente, se reportaron mejoras en la pérdida de agua (Traffano-Schiffó *et al.*, 2016; Nowacka, Wiktor *et al.*, 2019) y reducciones en el tiempo de deshidratación osmótica (Yu *et al.*, 2017). En lo que respecta a ganancia de sólidos, algunos estudios encontraron que los PEF pueden incrementarla (Amami *et al.*, 2014; Yu *et al.*, 2018) o reducirla (Traffano-Schiffó *et al.*, 2017; Nowacka, Wiktor *et al.*, 2019), dependiendo del tipo de agente osmótico (Tylewicz *et al.*, 2017) o del número de pulsos (Nazari *et al.*, 2019).

Tabla V. Aplicaciones del proceso de deshidratación osmótica asistido por campo eléctrico pulsado

| Matriz | Variables de proceso | Condiciones de deshidratación osmótica | Conclusiones ^a | Referencias |
|---|---|--|--|---------------------------------------|
| Arándano (<i>Vaccinium oxycoccus</i>) | Intensidad del campo: 5.5 kV / cm Número de pulsos: 10 Intervalo entre pulsos: 2 segundos Frecuencia: 0.5 Hz | 0.61 y 0.30 °Brix de sacarosa, 0.001 g glicósidos de esteviol / g solución, 4 g solución osmótica / g producto, 40 °C, 4,320 min | El uso de PEF promovió la aceleración de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica y redujo el contenido de sacarosa en los productos finales. | Nowacka, Wiktor <i>et al.</i> (2019) |
| Blueberries (<i>Vaccinium spp.</i>) | Intensidad del campo: 3 kV / cm 200 pulsos / segundos Duración del pulso: 1 μ s Duración: 5 min Temperatura: 20 °C | 0.70 g sacarosa y 0.00025 g de NaCl / g producto, 2 g solución osmótica / g producto, 40 °C, 200 rpm | El tratamiento con PEF redujo el tiempo de deshidratación osmótica de 130 a 48 h e incrementó la pérdida de agua y ganancia de solutos. | Yu <i>et al.</i> (2018) |
| Fresa var. <i>Alba</i> | Intensidad del campo: 0.1 - 0.4 kV / cm Duración del pulso: 100 μ s Frecuencia: 100 Hz Temperatura: 25 °C Solución: NaCl | 40 °Brix de sacarosa o trehalosa, 4 g solución osmótica / g producto, 25 °C, 120 min | Al aplicar una intensidad de campo eléctrico más baja (100 V / cm) se registró un aumento en la pérdida de agua tras una hora de deshidratación osmótica, para las fresas deshidratadas en solución de sacarosa (12 %) y trehalosa (6 %). El tratamiento de PEF incrementó la ganancia de solutos para los experimentos con sacarosa, pero con trehalosa se redujeron. | Tylewicz <i>et al.</i> (2017) |
| Kiwi var. <i>Hayward</i> , <i>Actinidia deliciosa</i> | Intensidad del campo: 0.1, 0.25 y 0.4 kV / cm Número de pulsos: 60 Intervalo entre pulsos: 100 μ s Frecuencia: 100 Hz Tiempo de repetición: 10 ms Temperatura: 25 °C | 61.5 °Brix de sacarosa, 4 g solución / g producto, 25 °C, 0 - 120 min | El tratamiento con PEF incrementó la pérdida de agua y redujo la ganancia de sacarosa durante la deshidratación osmótica. | Traffano-Schiffi <i>et al.</i> (2017) |
| Manzana | Intensidad del campo: 1, 1.5 y 2 kV / cm Número de pulsos: 8, 16 y 24 Duración del pulso: 0.02, 0.026 y 0.05 s Temperatura constante | 50 °Brix de sacarosa, 20 g solución osmótica / g producto, 40 °C, 140 rpm | La duración del pulso tuvo menor efecto en la pérdida de agua y ganancia de sólidos en comparación con la intensidad de campo y el número de pulsos. La aplicación de 8 - 16 pulsos durante el proceso DO-PEF incrementó los parámetros de transferencia de masa hasta los 24 pulsos, a partir de entonces estos se reducen. | Nazari <i>et al.</i> (2019) |

Tabla V. Aplicaciones del proceso de deshidratación osmótica asistido por campo eléctrico pulsado (continuación)

| Matriz | Variables de proceso | Condiciones de deshidratación osmótica | Conclusiones ^a | Referencias |
|-----------|--|--|---|----------------------------|
| Manzana | Intensidad del campo: 0.90 kV / cm Número de pulsos: 750 Intervalo entre pulsos: 100 µs | | | |
| Zanahoria | Intensidad del campo: 0.30 kV / cm Número de pulsos: 500 Intervalo entre pulsos: 100 µs | 65 °Brix de sacarosa, 3 g solución osmótica / g producto, 25 °C, 1,500 rpm | Durante la deshidratación osmótica, las muestras tratadas con PEF mostraron una mayor pérdida de agua (4 - 35 %) y ganancia de solutos (15 - 60 %) que las muestras sin tratar. | Amami <i>et al.</i> (2014) |
| Plátano | Intensidad del campo: 0.60 kV / cm Número de pulsos: 500 Intervalo entre pulsos: 100 µs Temperatura: 60 y 80 °C | | | |

^a PEF: campo eléctrico pulsado, DO-PEF: deshidratación osmótica asistida por campo eléctrico pulsado.

3.4. Ultrasonido y osmo-sonicación

El ultrasonido es un tipo de energía sonora emitida por ondas con frecuencias mayores a 20 kHz. Se clasifican en ondas de alta frecuencia (baja energía e intensidad, frecuencias mayores a 100 kHz) y baja frecuencia (alta energía e intensidad, frecuencias de 20-100 kHz) (Fernandes y Rodrigues, 2017). La cavitación –desarrollo e implosión de burbujas de gas–, que resulta de un ultrasonido con energía de baja frecuencia y alta intensidad, produce una variedad de efectos, entre ellos la regulación del contenido enzimático (activación o inactivación), y la mejora de la tasa de transferencia de masa y energía durante procesos de secado, congelación y deshidratación (Onwude *et al.*, 2017).

Aplicar ultrasonido antes de la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas tiene como objetivo generar cambios en la estructura del tejido celular para modificar la transferencia

de masa. El tratamiento consiste en sumergir el alimento sólido en agua destilada (deshidratación osmótica asistida con ultrasonido, DO-US), o bien, en una solución osmótica de menor o igual concentración al proceso de deshidratación osmótica (osmo-sonicación) (Bozkir *et al.*, 2019; Osae *et al.*, 2019). Posteriormente, a través de este medio líquido se propagan ondas ultrasónicas (emitidas, ya sea por un transductor de sonda, o en baño) (figura 4). Durante este tratamiento se originan dos fenómenos: el «efecto esponja» (compresión y expansión del material) y la formación de cavitaciones (desarrollo e implosión de burbujas de gas en el medio líquido) (Nowacka *et al.*, 2018). Las burbujas formadas debido a las cavitaciones implosionan (figura 4), generando una presión sobre la superficie de la matriz alimenticia, permitiendo así la remoción de partículas de agua fuertemente ligadas y la creación de microcanales que

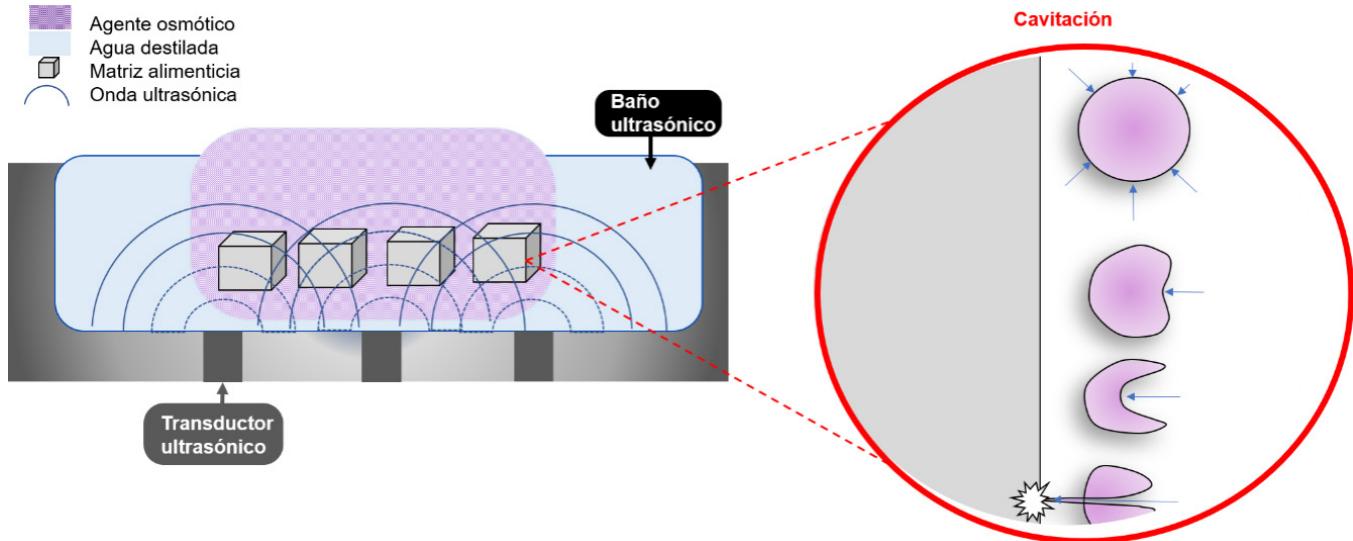


Figura 4.

Representación esquemática del sistema de tratamiento de osmo-sonicación de alimentos y colapso asimétrico de burbujas de vapor causadas por ultrasonido. Adaptada de Miano *et al.* (2017).

mejoran la transferencia de masa (Miano *et al.*, 2017). Nowacka, Tylewicz, Laghi, Dalla Rosa y Witrowa-Rajchert (2014) demostraron que se requiere de al menos 10 minutos de tratamiento para la formación de microcanales.

En la tabla VI se muestran algunas aplicaciones de la deshidratación osmótica asistida por ultrasonido y osmo-sonicación de frutas y hortalizas. Se ha registrado que el incremento de la frecuencia ultrasónica y el tiempo de tratamiento reducen la actividad de agua, puesto que generan una mayor pérdida (Kek *et al.*, 2013; Amami *et al.*, 2017; Allahdad *et al.*, 2019; Bozkir *et al.*, 2019). Sin embargo, durante las primeras etapas del proceso se observan pérdidas de agua, es decir, el producto

absorbe agua (Dias da Silva *et al.*, 2016; Allahdad *et al.*, 2019). Asimismo, durante la DO-us puede ocurrir ganancia de sólidos negativa debido a la lixiviación de sólidos (Dias da Silva *et al.*, 2016). Por otro lado, el incremento de la frecuencia ultrasónica, la concentración de la solución osmótica (osmo-sonicación) y el tiempo de proceso resultaron en un aumento de sólidos (Garcia-Noguera *et al.*, 2014; Nowacka *et al.*, 2014). Además de los beneficios que tiene el uso de ultrasonido al proceso de deshidratación osmóticas, estos tratamientos ayudan a aumentar los compuestos bioactivos, inactivar enzimas, así como mejorar el color y la textura del producto final (Kek *et al.*, 2013; Garcia-Noguera *et al.*, 2014; Osae *et al.*, 2019).

Tabla VI. Aplicaciones del proceso de deshidratación osmótica asistido por osmo-sonicación o ultrasonido

| Matriz | Tipo de tratamiento ultrasónico | Variables de proceso a | Condiciones de deshidratación osmótica | Conclusiones | Referencias |
|--|---------------------------------|--|--|---|------------------------------|
| Arilos de granada | Osmo-sonicación | $f = 25$ y 40 kHz $P = 100$ W $T = 30$ °C $t = 10 - 80$ min | 50 °Brix de sacarosa, 4 g solución osmótica / g producto, 30 °C, 70 rpm | La pérdida de agua aumentó con el tiempo de sonicación. Las muestras a 25 kHz mostraron la mayor cantidad de solutos filtrados; la menor actividad del agua se alcanzó a 40 kHz. | Allahdad et al. (2019) |
| Caqui (<i>Diospyros kaki</i> L.) | Osmo-sonicación | $f = 35$ kHz $P = 480$ W $T = 30$ °C $t = 10, 20$ y 30 min Medio: 45 °Brix de sacarosa | 70 °Brix de sacarosa, 4 g solución osmótica / g producto, 30 °C, 100 rpm | El tratamiento incrementó la pérdida de agua y ganancia de solutos; además esto se ve influenciado por el tiempo de sonicación y la frecuencia ultrasónica. | Bozkir et al. (2019) |
| Cranberry (<i>Vaccinium oxycoccus</i>) | Osmo-sonicación | $f = 35$ y 130 kHz $t = 10 - 80$ min | 40 - 60 °Brix sacarosa y 0 - 0.08 g NaOH / g solución, 10 g de solución osmótica / g, 25 °C, 150 rpm | El incremento de la frecuencia ultrasónica disminuyó la dureza y actividad de agua del producto. | Shamaei et al. (2012) |
| | Osmo-sonicación y ultrasonido | $f = 21$ kHz $P = 180$ W ($I = 3.6$ W / g) $t = 30$ min Medio: 4 g agua / g producto | 0.62 g sacarosa / g solución, 0.3 g sacarosa con 0.001 g glicósido de esteviol / g solución y 0.4 g trehalosa / g solución, 4 g solución osmótica / g producto, 40 °C, 4,320 min | Los parámetros de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica fueron influenciados por la aplicación de ultrasonido y osmo-sonicación y por la actividad de agua de las soluciones osmóticas. La osmo-sonicación permitió obtener mayor pérdida de agua. | Nowacka et al. (2018) |
| Fresa var. Camarosa | Osmo-sonicación | $f = 25$ kHz $P = 60$ W $T = 30$ °C $t = 10 - 45$ min | 25 y 50 °Brix de sacarosa, 4 g solución osmótica / g producto, 30 °C | El pretratamiento con ultrasonido y la deshidratación osmótica mejoraron el color en las muestras de fresa, especialmente después de una exposición ultrasónica prolongada y la aplicación de altas concentraciones de sacarosa con el pretratamiento. | Garcia-Noguera et al. (2014) |
| | Osmo-sonicación | $f = 40$ kHz $I = 0.20$ W / m ² $T = 20 - 40$ °C $t = 10, 20$ y 30 min | 32.5 y 65 °Brix de sacarosa, 20 - 40°C | La pérdida de agua aumentó con a la par del tiempo de sonicación; el corto tiempo de sonicación minimizó las pérdidas de color. | Amami et al. (2017) |
| Guayaba | Osmo-sonicación y ultrasonido | <i>Sonicación indirecta:</i> $f = 0 - 25$ kHz $P = 1, 1.75$ y 2.5 kW $t = 20 - 60$ min | 35 y 70 °Brix | La energía y amplitud del ultrasonido y el tiempo de osmo-sonicación incrementaron la pérdida de agua y ganancia de sólidos. | Kek et al. (2013) |
| | | <i>Sonicación indirecta:</i> $f = 20$ kHz $P = 400$ W $A = 15, 25$ y 35 % $t = 6 - 20$ min | | La sonicación indirecta mostró mejor aceptación sensorial (color). | |

Tabla VI. Aplicaciones del proceso de deshidratación osmótica asistido por osmo-sonicación o ultrasonido (continuación)

| Matriz | Tipo de tratamiento ultrasónico | Variables de proceso a | Condiciones de deshidratación osmótica | Conclusiones | Referencias |
|---|---------------------------------|--|--|--|------------------------------------|
| Melón (<i>Cucumis melo L.</i>) var. <i>cantalupensis</i> Naud | Osmo-sonicación y ultrasonido | $f = 25 \text{ kHz}$ $I = 4870 \text{ W / m}^2$ $T = 30^\circ\text{C}$ $t = 10, 20 \text{ y}$ 30 min | 50 °Brix sacarosa, 4 g solución osmótica / g producto, 30 °C | Al comienzo del proceso, la deshidratación osmótica asistida con ultrasonido presentó pérdidas de agua negativas (el producto absorbió agua) y la ganancia de sólidos incrementó a la par del tiempo de inmersión. | Dias da Silva <i>et al.</i> (2016) |
| Rebanadas de jengibre (<i>Zingiber officinale Roscoe</i>) | Osmo-sonicación y ultrasonido | $f = 33 \text{ kHz}$ $P = 600 \text{ W}$ $T = 30^\circ\text{C}$ $t = 30 \text{ min}$ <i>Para ultrasonido</i> Medio: 10 g agua / g producto <i>Para osmo-sonicación</i> Medio: 10 g solución osmótica / g producto | 20 °Brix de sacarosa, 10 g solución osmótica / g producto, 30 °C | El tratamiento de osmo-sonicación ayuda a inactivar las enzimas polifenol oxidasa y peroxidasa. | Osae <i>et al.</i> (2019) |
| Zanahoria negra (<i>Daucus carota ssp. sativus</i>) | Osmo-sonicación | $f = 37 \text{ kHz}$ $P = 550 \text{ W}$ $T = 40^\circ\text{C}$ $t = 5, 10 \text{ y } 15 \text{ min}$ Medio: 45 °Brix de sacarosa | 0.05, 0.1 y 0.15 g NaCl / g producto, 4 g solución osmótica / g producto, 40 °C, 125 rpm | La osmo-sonicación promovió la rotura de la estructura de los tejidos e incrementó la transferencia de masa. | Sucheta <i>et al.</i> (2019) |

^a f: frecuencia ultrasónica; P: potencia; I: intensidad; T: temperatura; t: tiempo de tratamiento; A: amplitud de onda.

4. Modelos y cinéticas de transferencia de masa durante el proceso de deshidratación osmótica

Al comienzo del proceso de deshidratación osmótica, como la diferencia entre la concentración de solutos de la solución osmótica y de la matriz alimenticia es grande, la pérdida de agua es muy rápida. Conforme el contenido de agua de la matriz alimenticia se reduce, la diferencia de concentraciones (presión osmótica) se vuelve más pequeña, por lo que la velocidad de transferencia disminuye hasta alcanzar un estado de equilibrio (Salim *et al.*, 2016). Como en la deshidratación osmótica ocurre un intercambio de agua y soluto, el proceso de deshidratación osmótica puede evaluarse mediante los parámetros de pérdida de agua, *PA* y ganancia de solutos, *GS* (Assis *et al.*, 2018), los cuales se pueden calcular con las siguientes ecuaciones (Allahdad *et al.*, 2019):

$$PA = \frac{m_{w0} - m_{wDO}}{m_{p0}}$$

Ecuación 1.

$$GS = \frac{m_s - m_{s0}}{m_{p0}}$$

Ecuación 2.

Donde PA es la pérdida de agua del producto (g agua/g producto fresco); GS , la ganancia de solutos (g soluto/g producto fresco); m_{w0} , la masa de agua inicial (g); m_{wDO} , la masa de agua del producto osmodeshidratado (g); m_{p0} , la masa del producto fresco (g); m_s , la masa del producto osmodeshidratado seco; y m_{s0} corresponde a la masa del producto fresco seco (g).

Los modelos de transferencia de masa para la deshidratación osmótica desprecian el flujo de soluto proveniente de la matriz alimenticia, ya que es muy pequeño comparado con la PA y GS (Pacheco-Angulo *et al.*, 2016). Los modelos que permiten predecir las cinéticas de PA y GS se clasifican en empíricos, semi-empíricos y fenomenológicos (Muñiz-Becerá *et al.*, 2017). En la tabla VII se presentan algunos modelos usados para describir estas curvas de proceso. Los modelos empíricos y semi empíricos dependen de las condiciones experimentales, ya que únicamente son válidos para las condiciones en que se calcularon. Además, algunos permiten predecir los valores de equilibrio con pocos puntos experimentales de la cinética (Azuara *et al.*, 1992; Alam *et al.*, 2019), por lo que, generalmente, se utili-

zan para calcular el estado de equilibrio para resolver algunos modelos fenomenológicos. Estos modelos tienen en cuenta los mecanismos del proceso, usan geometrías clásicas y se basan en la segunda ley de Fick para representar el mecanismo de difusión (Assis *et al.*, 2016).

En la tabla VIII vemos algunos ejemplos de la difusividad de transferencia de masa de frutas y hortalizas sometidas a deshidratación osmótica asistida por pulsos de vacío, altas presiones hidrostáticas, campos eléctricos pulsados y osmosonicación. Se muestra un incremento en la difusividad de transferencia de masa en los procesos de deshidratación osmótica asistida por estos métodos no térmicos. Asimismo, se observa un incremento en la difusividad de transferencia de masa debido a soluciones osmóticas con menor peso molecular (Dash *et al.*, 2019), debido al incremento en la concentración del soluto presente en la solución osmótica (George *et al.*, 2016; De Jesus Junqueira *et al.*, 2018) o al aumentar la magnitud del tratamiento no térmico (HHP y PEF) (Simpson *et al.*, 2015; Dermesonlouoglou *et al.*, 2016; Luo *et al.*, 2018; Dash *et al.*, 2019).

Tabla VII. Modelos matemáticos usados para describir la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas

| Nombre | Modelo | Descripción | Referencias |
|---|--|--|-----------------------------|
| | | Ecuación ^a | |
| <i>Modelos empíricos y semi-empíricos</i> | | | |
| Modelo de Azuara | $PA = \frac{s_1 \cdot t \cdot PA_e}{1 + s_1}; GS = \frac{s_2 \cdot t \cdot GS_e}{1 + s_2}$ | s_1, s_2 , constantes de velocidad relativa a la PA y GS | Azuara <i>et al.</i> (1992) |
| Modelo de Peleg | $PA = PA_0 \pm \frac{t}{k_{1,A} + t \cdot k_{2,A}}; GS = GS_0 \pm \frac{t}{k_{1,S} + t \cdot k_{2,S}}$ | $k_{1,A}, k_{1,S}$, constantes de velocidad ($s \cdot \text{kg de sólidos secos} / \text{kg de agua}$); $k_{2,A}, k_{2,S}$, constantes de capacidad ($\text{kg de sólidos secos} / \text{kg de agua}$); PA_0, GS_0 , PA y GS al inicio del proceso | Peleg (1988) |
| Modelo de Page | $\frac{PA}{PA_e} = 1 - \exp[-\alpha_A t^{\beta_A}]; \frac{GS}{GS_e} = 1 - \exp[-\alpha_S t^{\beta_S}]$ | α_A, α_S , constantes asociadas a PA y GS β_A, β_S , constantes de Page para PA y GS | Alam <i>et al.</i> (2019) |
| Modelo de Weibull | $\frac{PA}{PA_e} = 1 - \exp\left[\frac{t}{\gamma_A}\right]^{\delta_A}; \frac{GS}{GS_e} = 1 - \exp\left[\frac{t}{\gamma_S}\right]^{\delta_S}$ | $\gamma_A, \gamma_S, \delta_A, \delta_S$, parámetros asociados al modelo de Weibull | Pei <i>et al.</i> (2019) |

Tabla VII. Modelos matemáticos usados para describir la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas (continuación)

| Nombre | Modelo | Descripción | Referencias |
|--|---|--|----------------------------|
| | | | |
| <i>Modelos fenomenológicos obtenidos de la segunda ley de Fick</i> | | | |
| Solución analítica de Crank | $\psi_i = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_i \times t}{4 l^2} \right]$ | Geometría: placa plana; l , longitud característica (m); D_i , difusividad de transferencia de masa (m^2 / s); $i = A$ o S ; A = agua; S = solutos; $\psi_{i=A} = 1 - PA_e / PA$; $\psi_{i=S} = 1 - GS_e / GS$; n , número de nodos | Muñiz-Becerá et al. (2017) |
| | $\psi_i = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[n^2 \frac{D_i \times t}{r^2} \right]$ | Geometría: esférica; r , radio (m); t , tiempo (s); D_i , difusividad de transferencia de masa (m^2 / s); $i = A$ o S ; A = agua; S = solutos; $\psi_{i=A} = 1 - PA_e / PA$; $\psi_{i=S} = 1 - GS_e / GS$; n , número de nodos | |

^a PA: pérdida de agua (g agua / g producto fresco); GS: ganancia de solutos (g solutos / g producto fresco); t: tiempo de inmersión (s); PA_e (g agua / g producto fresco); GS_e (g solutos / g producto fresco); PA; GS en el equilibrio.

Tabla VIII. Difusividad de transferencia de masa de frutas y hortalizas sometidas a proceso de deshidratación osmótica asistido por pulsos de vacío, altas presiones, tratamiento eléctrico y osmo-sonicación

| Matriz (geometría) | Condiciones de proceso | | Difusividad $\times 10^9$ (m^2 / s) | | | | Referencias |
|--|--|--|---|---|-------|---------------|---------------------|
| | Tratamiento | Deshidratación osmótica | Agua / soluto | | | | |
| <i>Altas presiones hidrostáticas (HHP)</i> | | | | | | | |
| Rebanadas de <i>Zingiber officinale Roscoe</i> (placa plana) | Presión: 200 - 600 MPa Tiempo de tratamiento: 0.25 - 15 min | Agente osmótico: glucosa, fructosa y sacarosa Concentración de agente osmótico: 60 °Brix Relación agente osmótico y matriz: 4 g agente osmótico / g producto Temperatura: 40 °C | 0.322 | / | 0.199 | glucosa | Dash et al., (2019) |
| | | | 0.362 | / | 0.165 | fructosa | |
| | | | 0.396 | / | 0.396 | sacarosa | |
| | | | 2.277 | / | 1.730 | glucosa, HHP | |
| | | | 3.725 | / | 2.608 | | |
| | | | 2.618 | / | 1.483 | fructosa, HHP | |
| | | | 4.027 | / | 2.291 | | |
| | | | 2.890 | / | 1.283 | sacarosa, HHP | |
| | | | 4.293 | / | 4.293 | | |

Tabla VIII.

Difusividad de transferencia de masa de frutas y hortalizas sometidas a proceso de deshidratación osmótica asistido por pulsos de vacío, altas presiones, tratamiento eléctrico y osmo-sonicación (continuación)

| Matriz (geometría) | Condiciones de proceso | | Difusividad $\times 10^9$ (m ² / s) | | | Referencias |
|---|--|--|--|---|-------------|---|
| | Tratamiento | Deshidratación osmótica | Agua / soluto | | | |
| Rebanadas de manzana (placa plana) | Presión: 400 MPa Tiempo de tratamiento: 10 min | Agente osmótico: jugo de kokum (kk) y una mezcla de sacarosa y kokum (ss-kk) Concentración de agente osmótico: 10, 30 y 50 °Brix Relación agente osmótico y matriz: 3 g agente osmótico / g producto Temperatura: 40 °C | 1.58 | / | 0.22 | kk |
| | | | 1.48 | / | 0.23 | kk-ss |
| | | | 4.84 | / | 1.91 | |
| | | | 2.13 | / | 0.23 | kk, HHP |
| | | | 2.63 | / | 0.25 - 2.97 | |
| Cilindros de ciruela china, <i>Prunus mume</i> Siebert Zucc (cilindro infinito) | Presión: 50, 100, 200 y 400 MPa Tiempo de tratamiento: 10 min | Agente osmótico: sacarosa Concentración de agente osmótico: 40 °Brix Relación agente osmótico y matriz: 20 g agente osmótico / g producto Temperatura: 22 °C Tiempo: 360 min | 0.153 | / | - | - |
| | | | 0.268 | / | - | |
| | | | 0.376 | / | - | |
| | | | | | | |
| | | | | | | HHP |
| <i>Pulsos de vacío (PV)</i> | | | | | | |
| Rodajas de berengena, <i>Solanum melongena</i> L. (placa plana) | Presión de vacío: 108.8 mmHg Tiempo: 10 min | Agente osmótico: 10 % NaCl; 7.5 % NaCl + 2.5 % KCl; 7 % NaCl + 2.5 % KCl + 0.5 % CaCl ₂ (1); y 5 % NaCl + 4.0 % KCl + 1. % CaCl ₂ (2) Relación agente osmótico y matriz: 10 g agente osmótico / g producto Temperatura: 30 °C Tiempo: 10 - 360 min | 0.434 | / | 0.255 | NaCl |
| | | | 0.459 | / | 0.257 | NaCl : KCl |
| | | | 0.453 | / | 0.312 | NaCl : KCl : CaCl ₂ (1) |
| | | | 0.411 | / | 0.305 | NaCl : KCl : CaCl ₂ (2) |
| | | | 0.504 | / | 0.325 | NaCl - PV |
| | | | 0.546 | / | 0.287 | NaCl : KCl - PV |
| | | | 0.533 | / | 0.355 | NaCl : KCl : CaCl ₂ (1) - PV |
| | | | 0.499 | / | 0.111 | NaCl : KCl : CaCl ₂ (2) - PV |
| Rebanadas de manzana var. <i>Granny Smith</i> (placa plana) | Presión de vacío: 0.0114 MPa (85.4 mmHg) Tiempo: 20 min | Agente osmótico: 9 g de sacarosa / g de emulsión W ₁ / O / W ₂ (la emulsión agua en aceite se formó con la 9.98 × 10 ⁸ UFC de <i>Lactobacillus rhamnosus</i> LC705 / ml y 62 g aceite de semilla de uva; finalmente 30 g de la emulsión W ₁ / O se dispersó en 70 g de solución de 14 % de concentrado de proteína de suero de leche) Concentración: 40 - 60 °Brix Relación agente osmótico y matriz: 20 g agente osmótico / g producto Tiempo: 320 min | 0.163 | / | 0.57 | sin tratar |
| | | | - | / | - | |
| | | | 0.241 | / | 0.744 | |
| | | | | | | PV |
| Flores-Andrade et al. (2017) | | | 0.239 | / | 0.853 | PV |
| | | | - | / | 1.548 | |

Tabla VIII.

Difusividad de transferencia de masa de frutas y hortalizas sometidas a proceso de deshidratación osmótica asistido por pulsos de vacío, altas presiones, tratamiento eléctrico y osmo-sonicación (continuación)

| Matriz (geometría) | Condiciones de proceso | | Difusividad $\times 10^9$ (m ² / s) | | | Referencias |
|--|--|---|--|---|---------------------|--------------------|
| | Tratamiento | Deshidratación osmótica | Agua / soluto | | | |
| <i>Campo eléctrico pulsado (PEF)</i> | | | | | | |
| Discos de manzana var. <i>Jonagold</i> (discos de espesor infinito) | Intensidad de campo eléctrico: 800 V / cm Número de pulsos: 10 Duración del pulso: 100 μ s Intervalo entre pulsos: 100 ms Tiempo de relajación: 10 s Energía específica de consumo: 12 kJ / kg Temperatura constante | Agente osmótico: 0.20 y 0.60 g glicerol / g jugo de manzana Relación agente osmótico y matriz: 20 g agente osmótico / g producto Temperatura: 20 °C Tiempo: 180 min | 0.50 - 0.35 | / | 0.31 - 0.69 | PEF |
| Rebanadas de Kiwi var. <i>Hayward</i> (placa plana) | Intensidad de campo eléctrico: 70, 110 y 180 V / cm Número de pulsos: 250 Duración del pulso: 15 μ s Frecuencia: 300 Hz Energía específica de consumo: 8, 16.6 y 42.3 kJ / kg Temperatura: 20 °C | Agente osmótico: 0.30 g glicerol, 0.10 g trehalosa, 0.20 maltodextrina, ácido ascórbico, 0.1 g CaCl ₂ y 0.002 g ácido cítrico / g solución Relación agente osmótico y matriz: 5 g solución osmótica / g producto Temperatura: 25 - 45 °C Tiempo: 240 min | 0.323 - 1.13 | / | 1.25 - 1.81 | sin tratar |
| | | | 0.653 - 1.87 | / | 1.51 - 2.90 | PEF |
| Rebanadas rectangulares de manzana var. <i>Golden delicious</i> (prisma rectangular) | Tratamiento eléctrico Intensidad de campo eléctrico: 20 - 32 V / cm Tiempo: 10 - 30 s Temperatura: 30 °C | Agente osmótico: sacarosa Concentración de agente osmótico: 50 °Brix Temperatura: 40 °C Relación agente osmótico y matriz: 15 g agente osmótico / g producto Velocidad de agitación: 180 rpm | 0.0132 | / | 0.271 | sin tratar |
| | | | 0.124 - 0.262 | / | 0.101 - 0.277 | PEF-moderado |
| Manzana var. <i>Granny Smith</i> | Intensidad de campo eléctrico: 9, 13 y 17 V / cm Voltaje: 70 - 130 V Temperatura: 40 °C | Agente osmótico: sacarosa con sorbato de potasio y CaCl ₂ Concentración de agente osmótico: 45 - 65 °Brix con 7 mg sorbato de potasio / L y 1.27 - 1.13 g CaCl ₂ / L Temperatura: 40 °C Relación agente osmótico y matriz: 11 g agente osmótico / g producto | 0.148 - 0.181 | / | - | sin tratar |
| | | | 0.163 - 0.514 | / | - | PEF |
| <i>Osmo-sonicación (OUS)</i> | | | | | | |
| Mitades de ciruela var. <i>Victoria</i> (semi esfera) | Frecuencia: 25 kHz Tiempo: 30 y 60 min | Agente osmótico: glucosa y sacarosa Concentración de agente osmótico: 0.50 g (glucosa o sacarosa) / g solución Relación agente osmótico y matriz: 4 g agente osmótico / g producto Temperatura: 30 °C Tiempo: 180 min | - | / | 17.3 | glucosa y sacarosa |
| | | | - | / | 17.1 - 19.2 | glucosa, OUS |
| | | | - | / | 18.5 - 18.6 | sacarosa, OUS |

Yildiz et al. (2016)

Simpson et al. (2015)

Rahaman et al. (2019)

Tabla VIII.

Difusividad de transferencia de masa de frutas y hortalizas sometidas a proceso de deshidratación osmótica asistido por pulsos de vacío, altas presiones, tratamiento eléctrico y osmo-sonicación (continuación)

| Matriz (geometría) | Condiciones de proceso | | Difusividad $\times 10^9$ (m ² / s) | | | Referencias | |
|--|---|---|--|---|---------------------|---------------|-------------------------------|
| | Tratamiento | Deshidratación osmótica | Agua / soluto | | | | |
| Cubos de pepino (placa plana) | Frecuencia: 30 y 70 % Tiempo: 20 y 60 min | Agente osmótico: maltodextrina con NaCl | 0.004 - 0.012 | / | 0.005 - 0.012 | ous | Kiani <i>et al.</i> (2018) |
| | | Concentración de agente osmótico: 0.565 g maltodextrina, 0.05 o 0.045 g NaCl / g solución Relación agente osmótico y matriz: 5 g solución osmótica / g producto Temperatura: 25 °C | | | | | |
| Rebanadas de <i>Agaricus bisporus</i> (placa plana) | Frecuencia: 40 kHz Energía: 200 W Temperatura: 30 °C Tiempo: 15 - 75 min | Agente osmótico: sacarosa, glucosa y NaCl Concentración 0.40 - 0.60 g (sacarosa o glucosa) / g de solución 0.10 - 0.20 g NaCl / g de solución Relación agente osmótico y matriz: 10 g agente osmótico / g producto | 0.641 - 0.776 | / | 0.491 - 0.551 | sacarosa, ous | Pei <i>et al.</i> (2019) |
| | | | 0.703 - 0.908 | / | 1.038 - 1.111 | glucosa, ous | |
| | | | 1.291 - 1.948 | / | 0.611 - 0.667 | NaCl, ous | |

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Se han publicado avances acerca de la modificación de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas, considerando diversos parámetros, métodos no térmicos, modelos y cinéticas de proceso. La mayoría de los estudios indican que la selección de los parámetros óptimos del proceso, como el tiempo, la temperatura, la concentración del agente osmótico o el tipo de tratamiento no térmico, pueden modificar la calidad del producto e incrementar la transferencia de masa. Asimismo, el uso de tratamientos no térmicos y diferentes condiciones de proceso pueden generar frutas u hortalizas con diferente concentración de solutos. Finalmente, el uso de modelos matemáticos, como la segunda ley de Fick, junto con el modelo de Azuara o Page, son de gran ayuda para comprender mejor y predecir los fenómenos de transferencia

de masa de tratamientos no térmicos o diferentes condiciones de proceso.

A pesar de que estas tecnologías son prometedoras para la obtención de productos osmodeshidratados con alta calidad nutricional, no hay estudios que reporten la aplicación de estos métodos no térmicos con agentes osmóticos más complejos (como concentrados de frutas y hortalizas). Asimismo, se requieren mayores estudios que permitan escalar estos procesos a nivel industrial.

AGRADECIMIENTOS

El autor González-Pérez, J. E. 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 apoyo recibido para el financiamiento de sus estudios de posgrado.

REFERENCIAS

- Ahmed, I., Qazi, I. M. y Jamal, S. (2016). Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 34, 29-43. doi: 10.1016/j.ifset.2016.01.003
- Akharume, F., Smith, A., Sivanandan, L. y Singh, K. (2019). Recent progress on osmo-convective dehydration of fruits. *SDRP Journal of Food Science & Technology*, 4(9), 956-969. doi: 10.25177/JFST.4.9.RA.613
- Alam, M. S., Kaur, M. y Ramya, H. G. (2019). Mass transfer kinetics for osmotic dehydration of kinnow fruit in sugar solution. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 89(1), 361-370. doi: 10.1007/s40011-017-0951-z
- Alfaro, L., Siramard, S., Chouljenko, A. y Sathivel, S. (2018). Effects of liquid nitrogen pretreatment on the osmotic dehydration and quality of cryogenically frozen blueberries (*Vaccinium angustifolium* Ait.). *Food Bioscience*, 22, 165-169. doi: 10.1016/j.fbio.2018.02.006
- Allahdad, Z., Nasiri, M., Varidi, M. y Varidi, M. J. (2019). Effect of sonication on osmotic dehydration and subsequent air-drying of pomegranate arils. *Journal of Food Engineering*, 244, 202-211. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2018.09.017
- Amami, E., Khezami, L., Jemai, A. B. y Vorobiev, E. (2014). Osmotic dehydration of some agro-food tissue pre-treated by pulsed electric field: impact of impieller's Reynolds number on mass transfer and color. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 26(1), 93-102. doi: 10.1016/j.jksues.2012.10.002
- Amami, E., Khezami, W., Mezrigui, S., Badwaik, L. S., Bejar, A. K., Perez, C. T. y Kechaou, N. (2017). Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of strawberry. *Ultrasonics Sonochemistry*, 36, 286-300. doi: 10.1016/j.ulstsonch.2016.12.007
- An, K., Tang, D., Wu, J., Fu, M., Wen, J., Xiao, G. y Xu, Y. (2019). Comparison of pulsed vacuum and ultrasound osmotic dehydration on drying of Chinese ginger (*Zingiber officinale* Roscoe): Drying characteristics, antioxidant capacity, and volatile profiles. *Food Science & Nutrition*, 7(8), 2537-2545. doi: 10.1002/fsn3.1103
- Assis, F. R., Morais, R. M. S. C. y Morais, A. M. M. B. (2016). Mass transfer in osmotic dehydration of food products: Comparison between mathematical models. *Food Engineering Reviews*, 8(2), 116-133. doi: 10.1007/s12393-015-9123-1
- Assis, F. R., Morais, R. M. S. C. y Morais, A. M. M. B. (2018). Mathematical modelling of the osmotic dehydration of physalis. *Brazilian Journal of Food Technology*, 21. doi: 10.1590/1981-6723.10217
- Azuara, E., Beritain, C. y García, H. (1992). Development of a mathematical model to predict kinetics of osmotic dehydration. *Journal of Food Science and Technology*, 29, 239-242.
- Barbosa de Lima, A. G., Da Silva, J. V., Pereira, E. M. A., Dos Santos, I. B. y De Lima, W. M. P. B. (2016). Drying of bioproducts: Quality and energy aspects. En J. M. P. Q. Delgado y A. G. Barbosa de Lima (Eds.), *Drying and Energy Technologies* (pp. 1-18). Springer Cham. doi: 10.1007/978-3-319-19767-8_1
- Bera, D. y Roy, L. (2015). Osmotic dehydration of litchi using sucrose solution: Effect of mass transfer. *Journal of Food Processing & Technology*, 6(7). doi: 10.4172/2157-7110.1000462
- Bozkır, H., Rayman Ergün, A., Serdar, E., Metin, G. y Baysal, T. (2019). Influence of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments on drying and quality properties of persimmon fruit. *Ultrasonics Sonochemistry*, 54, 135-141. doi: 10.1016/j.ulstsonch.2019.02.006
- Brochier, B., Marczak, L. D. F. y Noreña, C. P. Z. (2015). Osmotic dehydration of yacon using glycerol and sorbitol as solutes: water effective diffusivity evaluation. *Food and Bioprocess Technology*, 8(3), 623-636. doi: 10.1007/s11947-014-1432-5
- Calín-Sánchez, Á., Kharaghani, A., Lech, K., Figiel, A., Carbonell-Barrachina, Á. A. y Tsotsas, E. (2015). Drying Kinetics and Microstructural and SensoryProperties of Black Chokeberry (*Aronia melanocarpa*) as Affected by Drying Method. *Food and Bioprocess Technology*, 8(1), 63-74. doi: 10.1007/s11947-014-1383-x
- Cano-Lamadrid, M., Lech, K., Michalska, A., Wasilewska, M., Figiel, A., Wojdylo, A. y Carbonell-Barrachina, Á. A. (2017). Influence of osmotic dehydration pre-treatment and combined drying method on physico-chemical and sensory properties of pomegranate arils, cultivar *Mollar de Elche*. *Food Chemistry*, 232, 306-315. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.04.033
- Chandra, S. y Kumari, D. (2015). Recent development in osmotic dehydration of fruit and vegetables: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(4), 552-561. doi: 10.1080/10408398.2012.664830
- Cheng, X., Zhang, M., Adhikari, B. y Islam, M. N. (2014). Effect of power ultrasound

- and pulsed vacuum treatments on the dehydration kinetics, distribution, and status of water in osmotically dehydrated strawberry: a combined NMR and DSC study. *Food and Bioprocess Technology*, 7(10), 2782-2792. doi: 10.1007/s11947-014-1355-1
- Chitrakar, B., Zhang, M. y Adhikari, B. (2019). Dehydrated foods: are they microbiologically safe? *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(17), 2734-2745. doi: 10.1080/10408398.2018.1466265
- Cichowska, J., Figiel, A., Stasiak-Różańska, L. y Witrowa-Rajchert, D. (2019). Modeling of osmotic dehydration of apples in sugar alcohols and dihydroxyacetone (DHA) solutions. *Foods (Basel, Switzerland)*, 8(1), 20. doi: 10.3390/foods8010020
- Cichowska, J. y Kowalska, H. (2018). Effect of osmotic pre-treatment and temperature storage conditions on water activity and colour of dried apple. *International Journal of Food Engineering*, 14(2). doi: 10.1515/ijfe-2017-0158
- Ciurzyńska, A., Kowalska, H., Czajkowska, K. y Lenart, A. (2016). Osmotic dehydration in production of sustainable and healthy food. *Trends in Food Science & Technology*, 50, 186-192. doi: 10.1016/j.tifs.2016.01.017
- Dash, K. K., Balasubramaniam, V. M. y Kamat, S. (2019). High pressure assisted osmotic dehydrated ginger slices. *Journal of Food Engineering*, 247, 19-29. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2018.11.024
- De Jesus Junqueira, J. R., Corrêa, J. L. G., De Mendonça, K. S., De Mello Júnior, R. E. y De Souza, A. U. (2018). Pulsed vacuum osmotic dehydration of beetroot, carrot and eggplant slices: Effect of vacuum pressure on the quality parameters. *Food and Bioprocess Technology*, 11(10), 1863-1875. doi: 10.1007/s11947-018-2147-9
- De Jesus Junqueira, J. R., Corrêa, J. L. G., De Mendonça, K. S., Resende, N. S. y De Barros Vilas Boas, E. V. (2017). Influence of sodium replacement and vacuum pulse on the osmotic dehydration of eggplant slices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 41, 10-18. doi: 10.1016/j.ifset.2017.01.006
- De Mello, R. E., Jr., Corrêa, J. L. G., Lopes, F. J., De Souza, A. U. y Da Silva, K. C. R. (2019). Kinetics of the pulsed vacuum osmotic dehydration of green fig (*Ficus carica L.*). *Heat and Mass Transfer*, 55(6), 1685-1691. doi: 10.1007/s00231-018-02559-w
- Dellarosa, N., Ragni, L., Laghi, L., Tylewicz, U., Rocculi, P. y Dalla Rosa, M. (2016). Time domain nuclear magnetic resonance to monitor mass transfer mechanisms in apple tissue promoted by osmotic dehydration combined with pulsed electric fields. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 37(C), 345-351. doi: 10.1016/j.ifset.2016.01.009
- Deng, L.-Z., Mujumdar, A. S., Zhang, Q., Yang, X.-H., Wang, J., Zheng, Z.-A., Gao, Z.-J. y Xiao, H.-W. (2019). Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: effects on drying characteristics and quality attributes - a comprehensive review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(9), 1408-1432. doi: 10.1080/10408398.2017.1409192
- Deng, Y. y Zhao, Y. (2008). Effects of pulsed-vacuum and ultrasound on the osmotic dehydration kinetics and microstructure of apples (Fuji). *Journal of Food Engineering*, 85(1), 84-93. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2007.07.016
- Dermesolouoglou, E. K., Angelikaki, F., Giannakourou, M. C., Katsaros, G. J. y Taoukis, P. S. (2019). Minimally processed fresh-cut peach and apricot snacks of extended shelf-life by combined osmotic and high pressure processing. *Food and Bioprocess Technology*, 12(3), 371-386. doi: 10.1007/s11947-018-2215-1
- Dermesolouoglou, E. K., Bimpilas, A., Andreou, V., Katsaros, G. J., Giannakourou, M. C. y Taoukis, P. S. (2017). Process optimization and kinetic modeling of quality of fresh-cut strawberry cubes pretreated by high pressure and osmosis. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(5), 1-14. doi: 10.1111/jfpp.13137
- Dermesolouoglou, E. K., Chalkia, A., Dimopoulos, G. y Taoukis, P. (2018). Combined effect of pulsed electric field and osmotic dehydration pre-treatments on mass transfer and quality of air dried goji berry. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 49, 106-115. doi: 10.1016/j.ifset.2018.08.003
- Dermesolouoglou, E. K. y Giannakourou, M. C. (2019). Evaluation and modelling of osmotic pre-treatment of peach using alternative agents in a multiple-component solution. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(3), 1240-1249. doi: 10.1002/jsfa.9296
- Dermesolouoglou, E. K., Zachariou, I., Andreou, V. y Taoukis, P. S. (2016). Effect of pulsed electric fields on mass transfer and quality of osmotically dehydrated kiwifruit. *Food and Bioproducts Processing*, 100(B), 535-544. doi: 10.1016/j.fbp.2016.08.009
- Dias da Silva, G., Barros, Z. M. P., De Medeiros, R. A. B., De Carvalho, C. B. O., Rupert Brandão, S. C. y Azoubel, P. M. (2016). Pretreatments for melon drying implementing ultrasound and vacuum. *LWT*, 74, 114-119. doi: 10.1016/j.lwt.2016.07.039

- El-Aouar, A. A., Azoubel, P. M., Barbosa, J. L. y Xidieh Murr, F. E. (2006). Influence of the osmotic agent on the osmotic dehydration of papaya (*Carica papaya* L.). *Journal of Food Engineering*, 75(2), 267-274. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.04.016
- Feng, Y., Yu, X., Yagoub, A. E. A., Xu, B., Wu, B., Zhang, L. y Zhou, C. (2019). Vacuum pretreatment coupled to ultrasound assisted osmotic dehydration as a novel method for garlic slices dehydration. *Ultrasonics Sonochemistry*, 50, 363-372. doi: 10.1016/j.ultsonch.2018.09.038
- Fernandes, F. A. N. y Rodrigues, S. (2017). Osmotic dehydration and blanching: Ultrasonic pre-treatments. En M. Villamiel et al. (Eds.), *Ultrasound in Food Processing* (pp. 311-328). Wiley-Blackwell. doi: 10.1002/9781118964156.ch11
- Flores-Andrade, E., Pascual-Pineda, L. A., Alarcón-Elvira, F. G., Rascón-Díaz, M. P., Pimentel-González, D. J. y Beristain, C. I. (2017). Effect of vacuum on the impregnation of *Lactobacillus rhamnosus* microcapsules in apple slices using double emulsion. *Journal of Food Engineering*, 202, 18-24. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2017.02.005
- Garcia-Noguera, J., Oliveira, F. I. P., Weller, C. L., Rodrigues, S. y Fernandes, F. A. N. (2014). Effect of ultrasonic and osmotic dehydration pre-treatments on the colour of freeze dried strawberries. *Journal of Food Science and Technology*, 51(9), 2222-2227. doi: 10.1007/s13197-012-0724-x
- George, J. M., Senthamil Selvan, T. y Rastogi, N. K. (2016). High-pressure-assisted infusion of bioactive compounds in apple slices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 33, 100-107. doi: 10.1016/j.ifset.2015.11.010
- Gómez-Ramírez, C., Sosa-Morales, M. E., Palou, E. y López-Malo, A. (2013). Aspergillus niger time to growth in dried tomatoes. *International Journal of Food Microbiology*, 164(1), 23-25. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2013.03.017
- González-Pérez, J. E., López-Méndez, E. M., Luna-Guevara, J. J., Ruiz-Espínosa, H., Ochoa-Velasco, C. E. y Ruiz-López, I. I. (2019). Analysis of mass transfer and morphometric characteristics of white mushroom (*Agaricus bisporus*) pilei during osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, 240, 120-132. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2018.07.026
- Kek, S. P., Chin, N. L. y Yusof, Y. A. (2013). Direct and indirect power ultrasound assisted pre-osmotic treatments in convective drying of guava slices. *Food and Bioproducts Processing*, 91(4), 495-506. doi: 10.1016/j.fbp.2013.05.003
- Ketata, M., Desjardins, Y. y Ratti, C. (2013). Effect of liquid nitrogen pretreatments on osmotic dehydration of blueberries. *Journal of Food Engineering*, 116(1), 202-212. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2012.10.035
- Kiani, H., Karimi, F., Labbafi, M. y Fathi, M. (2018). A novel inverse numerical modeling method for the estimation of water and salt mass transfer coefficients during ultrasonic assisted-osmotic dehydration of cucumber cubes. *Ultrasonics Sonochemistry*, 44, 171-176. doi: 10.1016/j.ultsonch.2018.02.003
- Kowalska, H., Marzec, A., Kowalska, J., Ciurzyńska, A., Samborska, K., Cichowska, J., Rybak, K. y Lenart, A. (2017). Osmotic dehydration of Honeoye strawberries in solutions enriched with natural bioactive molecules. *LWT - Food Science and Technology*, 85, 500-505. doi: 10.1016/j.lwt.2017.03.044
- Kuo, C.-H., Lin, J., Huang, C.-Y., Hsieh, S.-L., Li, S., Kuo, J.-M. y Shieh, C.-J. (2018). Predicting sugar content of candied watermelon rind during osmotic dehydration. *Food Science and Technology*, 38, 228-235. doi: 10.1590/fst.18817
- Kusnadi, C. y Sastry, S. K. (2012). Effect of moderate electric fields on salt diffusion into vegetable tissue. *Journal of Food Engineering*, 110(3), 329-336. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2012.01.004
- Lech, K., Figiel, A., Wojdyło, A., Korzeniowska, M., Serowik, M. y Szarycz, M. (2015). Drying kinetics and bioactivity of beetroot slices pretreated in concentrated chokeberry juice and dried with vacuum microwaves. *Drying Technology*, 33(13), 1644-1653. doi: 10.1080/07373937.2015.1075209
- Lech, K., Michalska, A., Wojdyło, A., Nowicka, P. y Figiel, A. (2017). The influence of the osmotic dehydration process on physicochemical properties of osmotic solution. *Molecules*, 22(12), 2246. doi: 10.3390/molecules22122246
- Lech, K., Michalska, A., Wojdyło, A., Nowicka, P. y Figiel, A. (2018). The influence of physical properties of selected plant materials on the process of osmotic dehydration. *LWT*, 91, 588-594. doi: 10.1016/j.lwt.2018.02.012
- Liu, B. y Peng, B. (2017). Modelling and optimization of process parameters for strawberry osmotic dehydration using central composite rotatable design. *Journal of Food Quality*, 2017(1), 1-7. doi: 10.1155/2017/2593213
- Luchese, C. L., Gurak, P. D. y Marczak, L. D. F. (2015). Osmotic dehydration of physalis (*Physalis peruviana* L.): evaluation of water loss and sucrose incorporation and the quantification of carotenoids. *LWT - Food Science and Technology*, 63(2), 1128-1136. doi: 10.1016/j.lwt.2015.04.060
- Luo, W., Tappi, S., Wang, C., Yu, Y., Zhu, S. y Rocculi, P. (2018). Study of the effect of High Hydrostatic Pressure (HHP) on the osmotic dehydration mechanism and kinetics of wumei fruit (*Prunus mume*). *Food and Bioprocess Technology*, 11(11), 2044-2054. doi: 10.1007/s11947-018-2165-7
- Martin-Belloso, O. y Morales-de la Peña, M. (2018). Fruit preservation by ohmic

- heating and pulsed electric fields. En A. Rosenthal *et al.* (Eds.), *Fruit Preservation* (pp. 441-456). Springer. doi: 10.1007/978-1-4939-3311-2_16
- Mavroudis, N. E., Dejmek, P. y Sjöholm, I. (2004). Osmotic-treatment-induced cell death and osmotic processing kinetics of apples with characterised raw material properties. *Journal of Food Engineering*, 63(1), 47-56. doi: 10.1016/S0260-8774(03)00281-4
- Mavroudis, N. E., Gidley, M. J. y Sjöholm, I. (2012). Osmotic processing: effects of osmotic medium composition on the kinetics and texture of apple tissue. *Food Research International*, 48(2), 839-847. doi: 10.1016/j.foodres.2012.06.034
- Miano, A. C., Rojas, M. L. y Augusto, P. E. D. (2017). Other mass transfer unit operations enhanced by ultrasound. En D. Bermudez-Aguirre (Ed.), *Ultrasound: Advances for Food Processing and Preservation* (pp. 369-389). Academic Press. doi: 10.1016/B978-0-12-804581-7.00015-4
- Mokhtarian, M., Heydari Majd, M., Koushki, F., Bakhshabadi, H., Daraei Garmakhany, A. y Rashidzadeh, S. (2014). Optimisation of pumpkin mass transfer kinetic during osmotic dehydration using artificial neural network and response surface methodology modelling. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 6(2), 201-214. doi: 10.3920/QAS2012.0121
- Monnerat, S. M., Pizzi, T. R. M., Mauro, M. A. y Menegalli, F. C. (2010). Osmotic dehydration of apples in sugar/salt solutions: concentration profiles and effective diffusion coefficients. *Journal of Food Engineering*, 100(4), 604-612. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2010.05.008
- Mújica-Paz, H., Valdez-Fragoso, A., López-Malo, A., Palou, E. y Welti-Chanes, J. (2003). Impregnation and osmotic dehydration of some fruits: effect of the vacuum pressure and syrup concentration. *Journal of Food Engineering*, 57(4), 305-314. doi: 10.1016/S0260-8774(02)00344-8
- Muñiz-Becerá, S., Méndez-Lagunas, L. L. y Rodríguez-Ramírez, J. (2017). Solute transfer in osmotic dehydration of vegetable foods: a review. *Journal of Food Science*, 82(10), 2251-2259. doi: 10.1111/1750-3841.13857
- Muszyński, S., Kornarzyński, K. y Gładyszewska, B. (2016). Osmotic dehydration of apples under reduced pressure conditions. *Agricultural Engineering*, 20(3), 135-143. doi: 10.1515/agriceng-2016-0051
- Nazari, A., Salehi, M. A. y Abbasi Souraki, B. (2019). Experimental investigation of effective factors of pulsed electric field in osmotic dehydration of apple. *Heat and Mass Transfer*, 55(7), 2049-2059. doi: 10.1007/s00231-019-02571-8
- Nowacka, M., Laghi, L., Rybak, K., Dalla Rosa, M., Witrowa-Rajchert, D. y Tylewicz, U. (2019). Water state and sugars in cranberry fruits subjected to combined treatments: Cutting, blanching and sonication. *Food Chemistry*, 299, 125122. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.125122
- Nowacka, M., Tylewicz, U., Laghi, L., Dalla Rosa, M. y Witrowa-Rajchert, D. (2014). Effect of ultrasound treatment on the water state in kiwifruit during osmotic dehydration. *Food Chemistry*, 144, 18-25. doi: 10.1016/j.foodchem.2013.05.129
- Nowacka, M., Tylewicz, U., Tappi, S., Siroli, L., Lanciotti, R., Witrowa-Rajchert, D. y Romani, S. (2018). Ultrasound assisted osmotic dehydration of organic cranberries (*Vaccinium oxycoccus*): study on quality parameters evolution during storage. *Food Control*, 93, 40-47. doi: 10.1016/j.foodcont.2018.05.005
- Nowacka, M., Wiktor, A., Anuszewska, A., Dadan, M., Rybak, K. y Witrowa-Rajchert, D. (2019). The application of unconventional technologies as pulsed electric field, ultrasound and microwave-vacuum drying in the production of dried cranberry snacks. *Ultrasonics Sonochemistry*, 56, 1-13. doi: 10.1016/j.ulsonch.2019.03.023
- Nowicka, P., Wojdyło, A., Lech, K. y Figiel, A. (2015a). Chemical composition, antioxidant capacity, and sensory quality of dried sour cherry fruits pre-dehydrated in fruit concentrates. *Food and Bioprocess Technology*, 8(10), 2076-2095. doi: 10.1007/s11947-015-1561-5
- Nowicka, P., Wojdyło, A., Lech, K. y Figiel, A. (2015b). Influence of osmodehydration pretreatment and combined drying method on the bioactive potential of sour cherry fruits. *Food and Bioprocess Technology*, 8(4), 824-836. doi: 10.1007/s11947-014-1447-y
- Núñez-Mancilla, Y., Pérez-Won, M., Uribe, E., Vega-Gálvez, A. y Di Scala, K. (2013). Osmotic dehydration under high hydrostatic pressure: effects on antioxidant activity, total phenolics compounds, vitamin C and colour of strawberry (*Fragaria vesca*). *LWT - Food Science and Technology*, 52(2), 151-156. doi: 10.1016/j.lwt.2012.02.027
- Núñez-Mancilla, Y., Vega-Gálvez, A., Pérez-Won, M., Zura, L., García-Segovia, P. y Di Scala, K. (2014). Effect of osmotic dehydration under high hydrostatic pressure on microstructure, functional properties and bioactive compounds of strawberry (*Fragaria vesca*). *Food and Bioprocess Technology*, 7(2), 516-524. doi: 10.1007/s11947-013-1052-5
- Omolola, A. O., Jideani, A. I. O. y Kapila, P. F. (2017). Quality properties of fruits as affected by drying operation. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(1), 95-108. doi: 10.1080/10408398.2013.859563
- Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R., Abdan, K., Chen, G. y Oladejo, A. O. (2017). Non-thermal hybrid drying of fruits and vegetables: a review of current

- technologies. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 43, 223-238. doi: 10.1016/j.ifset.2017.08.010
- Osae, R., Zhou, C., Xu, B., Tchabo, W., Tahir, H. E., Mustapha, A. T. y Ma, H. (2019). Effects of ultrasound, osmotic dehydration, and osmosonication pretreatments on bioactive compounds, chemical characterization, enzyme inactivation, color, and antioxidant activity of dried ginger slices. *Journal of Food Biochemistry*, 43(5), 1-14. doi: 10.1111/jfbc.12832
- Pacheco-Angulo, H., Herman-Lara, E., García-Alvarado, M. A. y Ruiz-López, I. I. (2016). Mass transfer modeling in osmotic dehydration: equilibrium characteristics and process dynamics under variable solution concentration and convective boundary. *Food and Bioproducts Processing*, 97, 88-99. doi: 10.1016/j.fbp.2015.11.002
- Parniakov, O., Bals, O., Lebovka, N. y Vorobiev, E. (2016). Effects of pulsed electric fields assisted osmotic dehydration on freezing-thawing and texture of apple tissue. *Journal of Food Engineering*, 183, 32-38. doi: 10.1016/j.jfooodeng.2016.03.013
- Pei, F., Xiao, K., Chen, L., Yang, W., Zhao, L., Fang, Y., Ma, N., Mariga, A. M. y Hu, Q. (2019). Mass transfer characteristics during ultrasound-assisted osmotic dehydration of button mushroom (*Agaricus bisporus*). *Journal of Food Science and Technology*, 56(4), 2213-2223. doi: 10.1007/s13197-019-03707-8
- Peleg, M. (1988). An empirical model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science*, 53(4), 1216-1217. doi: 10.1111/j.1365-2621.1988.tb13565.x
- Qiu, L., Zhang, M., Tang, J., Adhikari, B. y Cao, P. (2019). Innovative technologies for producing and preserving intermediate moisture foods: a review. *Food Research International*, 116, 90-102. doi: 10.1016/j.foodres.2018.12.055
- Rahaman, A., Zeng, X.-A., Kumari, A., Rafiq, M., Siddeeg, A., Manzoor, M. F., Baloch, Z. y Ahmed, Z. (2019). Influence of ultrasound-assisted osmotic dehydration on texture, bioactive compounds and metabolites analysis of plum. *Ultrasonics Sonochemistry*, 58, 104643. doi: 10.1016/j.ultsonch.2019.104643
- Rahman, M. S. (2017). State diagram of foods and its importance to food stability during storage and processing. En J. Ahmed (Ed.), *Glass Transition and Phase Transitions in Food and Biological Materials* (pp. 251-260). John Wiley & Sons. doi: 10.1002/9781118935682.ch11
- Rahman, S. M. A., Hoque, M. E., Rahman, S. y Hasanuzzaman, M. (2015). Osmotic dehydration of pumpkin using response surface methodology -influences of operating conditions on water loss and solute gain. *Journal of Bioprocessing & Biotechniques*, 5(5). doi: 10.4172/2155-9821.1000226
- Ramya, V. y Jain, N. K. (2017). A review on osmotic dehydration of fruits and vegetables: an integrated approach. *Journal of Food Process Engineering*, 40(3), 124-140. doi: 10.1111/jfpe.12440
- Rongtong, B., Suwonsichon, T., Ritthiruangdej, P. y Kasemsumran, S. (2018). Determination of water activity, total soluble solids and moisture, sucrose, glucose and fructose contents in osmotically dehydrated papaya using near-infrared spectroscopy. *Agriculture and Natural Resources*, 52(6), 557-564. doi: 10.1016/j.anres.2018.11.023
- Ruiz-López, I. I., Huerta-Mora, I. R., Vivar-Vera, M. A., Martínez-Sánchez, C. E. y Herman-Lara, E. (2010). Effect of osmotic dehydration on air-drying characteristics of chayote. *Drying Technology*, 28(10), 1201-1212. doi: 10.1080/07373937.2010.482716
- Sabarez, H. T. (2018). Thermal drying of foods. En A. Rosenthal et al. (Eds.), *Fruit Preservation* (pp. 181-210). Springer. doi: 10.1007/978-1-4939-3311-2_7
- Şahin, U. y Öztürk, H. K. (2016). Effects of pulsed vacuum osmotic dehydration (PVOD) on drying kinetics of figs (*Ficus carica* L.). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 36, 104-111. doi: 10.1016/j.ifset.2016.06.003
- Şahin, U. y Öztürk, H. K. (2018). Comparison between Artificial Neural Network model and mathematical models for drying kinetics of osmotically dehydrated and fresh figs under open sun drying. *Journal of Food Process Engineering*, 41(5), e12804. doi: 10.1111/jfpe.12804
- Salim, M. N. S., Gariépy, Y. y Raghavan, V. (2016). Effects of operating factors on osmotic dehydration of broccoli stalk slices. *Cogent Food & Agriculture*, 2(1). doi: 10.1080/23311932.2015.1134025
- Samborska, K., Eliasson, L., Marzec, A., Kowalska, J., Piotrowski, D., Lenart, A. y Kowalska, H. (2019). The effect of adding berry fruit juice concentrates and by-product extract to sugar solution on osmotic dehydration and sensory properties of apples. *Journal of Food Science and Technology*, 56(4), 1927-1938. doi: 10.1007/s13197-019-03658-0
- Sangeeta y Hathan, B. S. (2016). Studies on mass transfer and diffusion coefficients in elephant foot yam (*Amorphophallus* spp.) during osmotic dehydration in sodium chloride solution: Studies on mass transfer and diffusion coefficients

- in elephant foot yam. *Journal of Food Processing and Preservation*, 40(3), 521-530. doi: 10.1111/jfpp.12631
- Sethi, K. y Kaur, M. (2019). Effect of osmotic dehydration on physicochemical properties of pineapple using honey, sucrose and honey-sucrose solutions. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(1), 6257-6262. doi: 10.35940/ijeat.A2026.109119
- Shamaei, S., Emam-Djomeh, Z. y Moini, S. (2012). Ultrasound-assisted osmotic dehydration of cranberries: effect of finish drying methods and ultrasonic frequency on textural properties: ultrasound-osmotic dehydration of cranberry. *Journal of Texture Studies*, 43(2), 133-141. doi: 10.1111/j.1745-4603.2011.00323.x
- Shete, Y. V., Chavan, S. M., Champawat, P. S. y Jain, S. K. (2018). Reviews on osmotic dehydration of fruits and vegetables. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(2), 1964-1969.
- Simpson, R., Ramirez, C., Birchmeier, V., Almonacid, A., Moreno, J., Nuñez, H. y Jaques, A. (2015). Diffusion mechanisms during the osmotic dehydration of Granny Smith apples subjected to a moderate electric field. *Journal of Food Engineering*, 166, 204-211. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2015.05.027
- Sucheta, Chaturvedi, K. y Yadav, S. K. (2019). Ultrasonication assisted salt-spices impregnation in black carrots to attain anthocyanins stability, quality retention and antimicrobial efficacy on hot-air convective drying. *Ultrasonics Sonochemistry*, 58, 104661. doi: 10.1016/j.ulsonch.2019.104661
- Sulistyawati, I., Dekker, M., Fogliano, V. y Verkerk, R. (2018). Osmotic dehydration of mango: effect of vacuum impregnation, high pressure, pectin methylesterase and ripeness on quality. *LWT*, 98, 179-186. doi: 10.1016/j.lwt.2018.08.032
- Tiroutchelvame, D., Sivakumar, V. y Maran, P. (2015). Mass transfer kinetics during osmotic dehydration of amla (*Emblica officinalis* L.) cubes in sugar solution. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 21(4), 547-559. doi: 10.2298/CICEQ140712011T
- Traffano-Schiffo, M. V., Laghi, L., Castro-Giraldez, M., Tylewicz, U., Rocculi, P., Ragni, L., Dalla Rosa, M. y Fito, P. J. (2017). Osmotic dehydration of organic kiwifruit pre-treated by pulsed electric fields and monitored by NMR. *Food Chemistry*, 236, 87-93. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.02.046
- Traffano-Schiffo, M.V., Tylewicz, U., Castro-Giraldez, M., Fito, P. J., Ragni, L. y Dalla Rosa, M. (2016). Effect of pulsed electric fields pre-treatment on mass trans- port during the osmotic dehydration of organic kiwifruit. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 38, 243-251. doi: 10.1016/j.ifset.2016.10.011
- Tylewicz, U., Tappi, S., Mannozzi, C., Romani, S., Dellarosa, N., Laghi, L., Ragni, L., Rocculi, P. y Dalla Rosa, M. (2017). Effect of pulsed electric field (PEF) pre-treatment coupled with osmotic dehydration on physico-chemical characteristics of organic strawberries. *Journal of Food Engineering*, 213, 2-9. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2017.04.028
- Verma, D., Kaushik, N. y Rao, P. S. (2014). Application of high hydrostatic pressure as a pretreatment for osmotic dehydration of banana slices (*Musa cavendishii*) finish-dried by dehumidified air drying. *Food and Bioprocess Technology*, 7(5), 1281-1297. doi: 10.1007/s11947-013-1124-6
- Wang, J., Law, C.L., Nema, P. K., Zhao, J.H., Liu, Z.L., Deng, L.Z. y Xiao, H.W. (2018). Pulsed vacuum drying enhances drying kinetics and quality of lemon slices. *Journal of Food Engineering*, 224, 129-138. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2018.01.002
- Witrowa-Rajchert, D., Wiktor, A., Sledz, M. y Nowacka, M. (2014). Selected emerging technologies to enhance the drying process: a review. *Drying Technology*, 32(11), 1386-1396. doi: 10.1080/07373937.2014.903412
- Wu, X., Wang, C. y Guo, Y. (2020). Effects of the high-pulsed electric field pretreatment on the mechanical properties of fruits and vegetables. *Journal of Food Engineering*, 274, 109837. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2019.109837
- Yadav, A. K. y Singh, S. V. (2014). Osmotic dehydration of fruits and vegetables: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 51(9), 1654-1673. doi: 10.1007/s13197-012-0659-2
- Yildiz, H., Icier, F., Eroglu, S. y Dagci, G. (2016). Effects of electrical pretreatment conditions on osmotic dehydration of apple slices: experimental investigation and simulation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 35, 149-159. doi: 10.1016/j.ifset.2016.05.001
- Yu, Y., Jin, T. Z., Fan, X. y Wu, J. (2018). Biochemical degradation and physical migration of polyphenolic compounds in osmotic dehydrated blueberries with pulsed electric field and thermal pretreatments. *Food Chemistry*, 239, 1219-1225. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.07.071
- Yu, Y., Jin, T. Z., Fan, X. y Xu, Y. (2017). Osmotic dehydration of blueberries pretreated with pulsed electric fields: effects on dehydration kinetics, and microbiological and nutritional qualities. *Drying Technology*, 35(13), 1543-1551. doi: 10.1080/07373937.2016.1260583

Obtención de compuestos bioactivos y enzimas

a partir de la fermentación de algas

A. Pérez-Alva*, M. M. Ramírez-Rodrigues y D. K. Baigts-Allende

*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos
Correo electrónico: alexa.perezaa@udlap.mx

RESUMEN

El objetivo de este artículo de revisión es proporcionar información actualizada sobre las diferentes aplicaciones de la fermentación de micro y macroalgas para obtener compuestos bioactivos y enzimas. Los estudios de fermentación de algas se han centrado en analizar la mejora del contenido fenólico, que está relacionado positivamente con la capacidad antioxidante. Además, se ha estudiado la producción de enzimas, carotenoides y polisacáridos, así como la mejora de la digestibilidad y biodisponibilidad de los péptidos. A pesar de que se ha investigado la producción de alimentos fermentados a base de algas y piensos para la acuicultura, este es un nicho que aún se encuentra en desarrollo, puesto que la mayoría de los estudios estudia el uso de algas para la obtención de biocombustibles y tratamiento de aguas residuales.

Palabras clave: fermentación, macroalgas, microalgas.

ABSTRACT

The objective of this review is to provide current information on the different applications of micro and macroalgae fermentation to obtain bioactive compounds and enzymes. The algal fermentation studies have focused on the improvement of the phenolic content, which is positively correlated to the antioxidant capacity. In addition, the production of carotenoids, enzymes and polysaccharides, as well as the improvement of the digestibility and bioavailability of peptides have also been studied. Notwithstanding the investigations regarding fermented algae-based foods and feed for aquaculture, this is a research segment that is still developing, since most studies focus on the use of algae for obtaining biofuels and wastewater treatment.

Keywords: fermentation, macroalgae, microalgae.

ABREVIATURAS

| | |
|------|--|
| ABTS | Inhibición del 2, 2'-azinobis-3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfónico, por sus siglas en inglés |
| APTT | Tiempo de tromboplastina parcial activado, por sus siglas en inglés |
| DO | Densidad óptica |
| DPPH | Inhibición del 2,2-difenil-1-picrilhydrazil, por sus siglas en inglés |
| FRAP | Capacidad antioxidante para reducir ion férrico, por sus siglas en inglés |
| GAE | Equivalentes de ácido gálico, por sus siglas en inglés |
| ORAC | Capacidad de absorción de radicales de oxígeno, por sus siglas en inglés |
| PGE | Equivalentes de floroglucinol dihidrato, por sus siglas en inglés |
| TE | Equivalentes de trolox, por sus siglas en inglés |

INTRODUCCIÓN

Las algas son un grupo heterogéneo de organismos que generalmente se describen como plantas acuáticas. Japón, China y Corea tienen una larga historia consumiéndolas (Takei *et al.*, 2017). De hecho, las microalgas azul-verdes se han empleado como alimento por miles de años, mientras que la literatura más antigua en la que se menciona su uso como tributo y alimento es el Código *Taiho Ritsuryo* promulgado en 701 d. C. en Japón. Sin embargo, fue hasta principios de la década de 1950 que se implementó el cultivo de microalgas como fuente novedosa de proteína (Spolaore *et al.*, 2006; Takuei *et al.*, 2017).

Las algas, al ser organismos fotoautótrofos, producen metabolitos primarios y secundarios, que pueden presentar beneficios nutrimentales y actividad biológica por sus propiedades antioxidantes, antimicrobianas y antiinflamatorias, entre otras (Amorim

et al. 2012; Chye *et al.*, 2018; Tanna y Mishra, 2018). Durante los últimos años, los metabolitos primarios, como péptidos y polisacáridos, así como los metabolitos secundarios, entre los que se encuentran polifenoles y pigmentos, han despertado el interés de la población, por lo que se han investigado diversos métodos para su obtención, como la hidrólisis ácida, la digestión enzimática y la extracción con solventes. A pesar de que los métodos estudiados son efectivos, al ser procedimientos complejos y tener costos elevados, pueden tener limitaciones. Debido a esto, se han buscado métodos de producción alternativos de menor costo, que sean amigables con el ambiente y en los que no se generen residuos tóxicos (Shobharani *et al.*, 2013). La fermentación es una buena alternativa, ya que es capaz de generar compuestos de alta calidad y alta actividad, sin el riesgo de la toxicidad asociada a solventes orgánicos (Martins *et al.*, 2011). La fermentación es una de las tecnologías de procesamiento de alimentos más antiguas e importantes, no solo aumenta la vida útil de los alimentos, sino que les confieren propiedades nutrimentales y sensoriales únicas (Navarrete-Bolaños, 2012; Erkmen y Bozoglu, 2016; Niccolai *et al.*, 2019). La fermentación de algas inició entre 1970 y 1980, con el objetivo de producir biocombustibles y como fuente de energía. Fue hasta hace pocos años que se comenzó a investigar la posibilidad de utilizar algas como sustrato para la producción de compuestos bioactivos por medio de fermentaciones ácido lácticas o alcohólicas (Uchida y Miyoshi, 2013). El objetivo de este artículo de revisión es proporcionar información actualizada sobre las diferentes aplicaciones de la fermentación de micro y macroalgas para obtener compuestos bioactivos y enzimas.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. Generalidades de las algas

Las algas son un grupo de organismos muy comunes que habitan la Tierra. Se estima que el número conocido de especies varía entre 30,000 y 1 millón (Ścieszka y Klewicka, 2018). Son organismos fotosintéticos que se pueden desarrollar en hábitats diversos, pero predominantemente crecen en ecosistemas acuáticos, ya

sea en agua dulce o salada. Sin embargo, también pueden encontrarse en rocas, paredes, tierra e incluso en plantas y animales, en simbiosis (Kim, 2011; Amorim-Carrilho *et al.*, 2014; Tebbani *et al.*, 2014; Ścieszka y Klewicka, 2018). Adicionalmente, tienen la capacidad de adaptarse a condiciones extremas, como cambios en la salinidad, temperatura, nutrientes e incluso radiación UV-VIS (Amorim-Carrilho *et al.*, 2014). Con la finalidad de sobrevivir, durante el proceso de adaptación, producen una gran variedad de metabolitos primarios y secundarios que no pueden ser encontrados en otros organismos (Ścieszka y Klewicka, 2018). Algunos de estos compuestos son polisacáridos y polifenoles, los cuales han sido reconocidos por tener aplicaciones farmacológicas y terapéuticas (Shobharani *et al.*, 2013).

Las algas tienen la capacidad de convertir la energía lumínica y fuentes de carbono –como el dióxido de carbono– en biomasa (Kim, 2011; Tebbani *et al.*, 2014). Su morfología y tamaño son muy variables, por lo que se suelen dividir en dos grupos principales: macroalgas y microalgas (Kim, 2011). Las macroalgas son organismos multicelulares, que pueden medir hasta 70 m de longitud y tener un crecimiento de 50 cm diarios. Por otra parte, las microalgas pueden medir entre 3-10 μm (Tebbani *et al.*, 2014; Ścieszka y Klewicka, 2018).

1.1. Macroalgas

Generalmente, las macroalgas se encuentran en litorales (Kim, 2011). De acuerdo con los tipos de pigmentos que producen, se dividen en tres subgrupos principales: algas pardas (*Phaeophyceae*), algas rojas (*Rhodophyceae*) y algas verdes (*Chlorophyceae*) –algunos autores agregan como cuarto grupo a los pastos marinos (*Magnoliophyceae*)–. En las algas pardas predomina el color café debido a la presencia de fucoxantina, mientras que en las rojas se encuentran pigmentos como la ficoeritrina y ficocianina, y las algas verdes contienen clorofilas del tipo a y b (Kim, 2011; Ścieszka y Klewicka, 2018). Las macroalgas se componen principalmente de carbohidratos (50-70 % b.s.) y contienen, además, vitaminas y minerales (Uchida y Miyoshi, 2013; Chye *et al.*, 2018). Los carbohidratos presentes varían dependiendo del tipo de alga. En las algas pardas predominan los alginatos y fucanos, en las algas rojas se

pueden encontrar galactanos sulfatados, xilanos y almidón floridano. Mientras que las algas verdes contienen almidón, xilanos, mananos, polisacáridos iónicos que contienen grupos sulfato, ácidos iónicos, ramnosa, xilosa, galactosa y arabinosa. También se ha reportado que todas las algas contienen celulosa (Hamed *et al.*, 2015). Las algas pardas también contienen ácidos grasos, como el ácido 18:3 α -linolénico y el ácido 20:5 eicosapentaenoico (Abidov *et al.*, 2010).

1.2. Microalgas

Las microalgas se consideran los primeros organismos productores de oxígeno y se estima que se han encontrado en los océanos desde hace tres billones de años. Son responsables de haber transformado la composición de la atmósfera, permitiendo así el desarrollo y evolución de plantas y animales (Tebbani *et al.*, 2014). Las microalgas, también conocidas como fitoplancton, tienen una gran capacidad de adaptación y supervivencia que les ha permitido colonizar la mayoría de los ecosistemas. Se pueden encontrar en aguas termales, hielo, agua con elevadas concentraciones de sal o acidez, cuevas, en simbiosis, e incluso como parásitos (Kim, 2011; Tebbani *et al.*, 2014). Las cianobacterias son también conocidas como algas azul-verde y se suelen clasificar con las algas, específicamente con las microalgas, debido a que poseen similitudes fisiológicas y fotosintéticas. Estas pueden crecer como células individuales o asociadas en cadenas o pequeñas colonias (De Freitas Coêlho *et al.*, 2019; Nicoletti, 2016).

De manera tradicional, las microalgas se clasifican de acuerdo a sus características morfológicas y citológicas, tipo de metabolitos de reserva, pigmentos y componentes de su pared celular (Ścieszka y Klewicka, 2018). Dentro de este grupo se encuentran las diatomeas (*Bacillariophyta*), dinoflagelados (*Dinophyta*), flagelados verdes y marrones (*Chlorophyta*, *Prasinophyta*, *Prymnesiophyta*, *Cryptophyta*, *Chrysophyta* y *Rhaphidophyta*), y las algas azul-verde (*Cyanophyta*) (Kim, 2011).

En general, las microalgas, tienen tres principales pigmentos: clorofilas, carotenoides y ficoliproteínas. En cuanto a su morfología, pueden ser esféricas, en forma de media luna, de espiral, gota e incluso en forma de estrella (Tebbani *et al.*, 2014). Estas

diferencias se pueden ver reflejadas en los metabolitos que producen y su utilización. Algunas especies producen compuestos como carotenoides y ácidos grasos, los cuales son importantes para la salud, mientras que otras especies se utilizan en el tratamiento de aguas residuales o en la agricultura como acondicionadores de suelos (Paul *et al.*, 2013).

Entre las microalgas más conocidas se encuentran *Chlorella* y *Arthospira*. Mientras que la primera es una microalga unicelular, la segunda es una cianobacteria filamentosa, multicelular. Ambas microalgas viven en agua dulce y poseen compuestos bioactivos. El nombre de *Chlorella* proviene del griego *chloros* y el latín *ella*, que significa verde y pequeño, respectivamente. Por otra parte, el nombre de *Spirulina*, que comúnmente se da a *Arthospira*, se debe a su forma espiral. Sin embargo, también se han identificado microalgas pertenecientes a este género que presentan una forma lineal. Estas microalgas se denominan comúnmente como algas-cianobacterias de color azul-verdoso (Andrade *et al.*, 2018). Debido a esta denominación, para fines de este trabajo se considerará a *A. platensis* como una microalga y se incluirá en el apartado de fermentación de microalgas.

2. Fermentación de macroalgas para la obtención de compuestos bioactivos

Para abordar los estudios sobre la fermentación de macroalgas, se han dividido de acuerdo a su clasificación en algas pardas, rojas y verdes. En la tabla I se puede observar un resumen de las especies de algas y microorganismos utilizados, así como las condiciones de fermentación y el resultado obtenido en varios estudios.

2.1. Fermentación de algas pardas

Las algas pardas son el grupo de algas más estudiado para llevar a cabo distintos tipos de fermentación. La mayoría de autores han realizado una fermentación ácido-láctica (Mun *et al.*, 2017), utilizando *Lactobacillus plantarum* (Gupta *et al.*, 2011; Nemoto *et al.*, 2017; Takei *et al.*, 2017), *Lactobacillus brevis* (Lee *et al.*, 2010; Cha *et al.*, 2011; Kang, *et al.*, 2011; Kang *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2013) o mezclas de 2 o más lactobacilos (Uchida *et al.*, 2007; Shobharani *et al.*, 2013; Eda *et al.*, 2016; Kuda *et al.*,

2016; Mun *et al.*, 2017). Algunos autores las han utilizado para la obtención de ácido butírico (Oh *et al.*, 2019) y carotenoides (Leyton *et al.*, 2019). Mientras que otros han buscado mejorar su capacidad antiinflamatoria (Lin *et al.*, 2016; Lee *et al.*, 2011 y Mun *et al.*, 2017).

Algunos autores han demostrado que es posible obtener polisacáridos con diferente bioactividad mediante el proceso de fermentación. Tal es el caso del trabajo realizado por DeZoysa *et al.* (2008), quienes obtuvieron polisacáridos sulfatados con capacidad anticoagulante mediante la fermentación de *Sargassum fulvellum*. Sin embargo, los polisacáridos obtenidos requirieron mayor concentración (180 mg/ml) que la heparina (60 mg/ml) para tener el mismo tiempo de coagulación en el tiempo de tromboplastina parcial activado (ATTP). Por otra parte, Lee *et al.* (2011) reportaron la obtención de polisacáridos con capacidad antiinflamatoria mediante la fermentación de *Ecklonia cava*. Además, observaron un aumento en el contenido de carbohidratos, proteína cruda y lípidos, pero una disminución en el contenido de polifenoles. En otro estudio con la misma alga, se obtuvieron polisacáridos con efecto radio protector, el cual disminuyó la apoptosis de esplenocitos expuestos a radiación ionizante (Lee *et al.*, 2013).

Asimismo, es posible mejorar la capacidad antioxidante de las algas mediante la fermentación. Presentándose solo un resultado contradictorio por parte de Takei *et al.* (2017), quienes no fueron capaces de fermentar las algas *Sargassum fusiforme* y *Eisenia bicyclis*. Los autores mencionan que la elevada concentración de compuestos fenólicos presentes en las algas pardas pudo haber tenido un efecto antimicrobiano, afectando el proceso de fermentación. Dichos autores cuantificaron el contenido de polifenoles y capacidad antioxidante de las algas sin fermentar, obteniendo un contenido de polifenoles de 0.6 y 0.8 mmol PGE/L, respectivamente. Ambas algas tuvieron un porcentaje de inhibición de DPPH del 60-80 %, el cual fue similar a los resultados con el método de FRAP, siendo valores que mostraron una correlación positiva con el contenido de polifenoles. Sin embargo, los resultados con el método ORAC fueron muy bajos en ambas muestras (10-40 %).

Tabla I. Fermentación de macroalgas para la obtención de diversos compuestos

| Tipo de algas | Especie | Origen del alga | Microorganismo | Condiciones de fermentación | Resultado obtenido | Referencia |
|---------------|-----------------------------------|---|--|--|--|--------------------------------|
| Algas pardas | <i>Chorda filum</i> | Península Noto | <i>Lactobacillus plantarum</i> AN6 y <i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i> Noto-SU1 | 30 °C por 2 d | ↑ capacidad antioxidante | (Kuda et al., 2016) |
| | <i>Dictyopteris polypodioides</i> | Karachi, Pakistán | <i>Bacillus licheniformis</i> , <i>Aspergillus flavus</i> y <i>Aspergillus terreus</i> | Fermentación de sustrato sólido y sumergida 30 °C por 4 d (hongos) 37 °C por 24 h (bacteria) | Enzimas pectinolíticas | (Pervez et al., 2017) |
| | <i>Ecklonia cava</i> | Isla Jeju, Corea del Sur | <i>Candida utilis</i> , <i>Lactobacillus brevis</i> y <i>Saccharomyces cerevisiae</i> | 30 °C, agitación de 1,200 rpm por 24 h | Polisacárido con capacidad anti inflamatoria | (Lee et al., 2011) |
| | | No se menciona | <i>C. utilis</i> | 30 °C, agitación de 120 rpm por 4 d | ↑ polifenoles ↑ capacidad antioxidante | (Wijesinghe et al., 2012) |
| | <i>Ecklonia kurome</i> | Península Noto | <i>L. plantarum</i> AN6 y <i>L. lactis</i> subsp. <i>lactis</i> Noto-SU1 | 30 °C por 2 d | ↑ capacidad antioxidante | (Kuda et al., 2016) |
| | <i>Ecklonia stenorhiza</i> | Península Noto | <i>L. plantarum</i> AN6 y <i>L. lactis</i> subsp. <i>lactis</i> Noto-SU1 | 30 °C por 2 d | ↑ capacidad antioxidante | (Kuda et al., 2016) |
| | <i>Fucus vesiculosus</i> | Praia Norte, Viana do Castelo, Portugal | <i>Aspergillus niger</i> PSH y <i>Mucor sp.</i> | Fermentación de sustrato sólido 36 °C por 92 h | Enzimas fucoidanasas | (Rodríguez-Jasso et al., 2013) |
| | <i>Laminaria digitata</i> | Irlanda | <i>L. plantarum</i> ATCC 8014 | 37 °C por 14 h | Es posible llevar a cabo su fermentación | (Gupta et al., 2011) |
| | | Busan, Corea del Sur | <i>L. brevis</i> BJ20 | 37 °C por 5 d | ↑ ácido γ-aminobutírico (gaba) | (Lee et al., 2010) |
| | <i>Laminaria japonica</i> | Costa Yantai, Shandong, China | <i>Yarrowia lipolytica</i> | 30 °C por 72 h | Oligosacáridos de alginato | (Li et al., 2019) |
| | <i>Laminaria saccharina</i> | Quemoy, Taiwán | <i>Bacillus subtilis</i> | 37 °C, agitación de 150 rpm por 72 h | ↑ capacidad anti inflamatoria | (Lin et al., 2016) |
| | | Irlanda | <i>L. plantarum</i> ATCC 8014 | 37 °C por 14 h | Es posible llevar a cabo su fermentación | (Gupta et al., 2011) |

Tabla I.

Fermentación de macroalgas para la obtención de diversos compuestos (continuación)

| Tipo de algas | Especie | Origen del alga | Microorganismo | Condiciones de fermentación | Resultado obtenido | Referencia |
|---------------|-----------------------------|--|---|--|---|-----------------------------------|
| Algas pardas | <i>Macrocystis pyrifera</i> | Puerto Montt, Chile | <i>Rhodotorula mucilaginosa</i> | 25 °C, agitación de 150 rpm por 3 d | Carotenoides | (Leyton <i>et al.</i> , 2019) |
| | <i>Sargassum fusiforme</i> | Península de Miura | <i>L. plantarum</i> Miura-SU1 y <i>L. lactis</i> subsp. <i>lactis</i> Miura-SU2 | 30 °C por 2 d | ↑ capacidad antioxidante | (Eda <i>et al.</i> , 2016) |
| | <i>Sargassum fulvellum</i> | Isla Jeju, Corea del Sur | No se menciona | 25 °C por 10 semanas, agitación diaria 200 rpm por 5 min | Polisacáridos sulfatados con actividad anticoagulante | (De Zoysa <i>et al.</i> , 2008) |
| | <i>Sargassum horneri</i> | Península de Miura | <i>L. plantarum</i> Miura-SU1 y <i>L. lactis</i> subsp. <i>lactis</i> Miura-SU2 | 30 °C por 2 d | ↑ capacidad antioxidante | (Eda <i>et al.</i> , 2016) |
| | <i>Saccharina japonica</i> | Seúl, Corea del Sur | 13 cepas de <i>Clostridium tyrobutyricum</i> | 50 °C por 48 h | Ácido butírico | (Oh <i>et al.</i> , 2019) |
| | <i>Sargassum</i> sp. | Costa oeste de India | <i>Pediococcus Acidilactici</i> , <i>Weissella paramesenteroides</i> , <i>Pediococcus Pentosaceus</i> y <i>Enterococcus faecium</i> | Pre-tratamiento enzimático para remover celulosa, incubación a 37 °C por 12 d | ↑ polifenoles, ↑ capacidad antioxidante, ↑ anticoagulante | (Shobharani <i>et al.</i> , 2013) |
| | <i>Sargassum thunbergii</i> | Parajeju, provincia de Jeju, Corea del Sur | <i>Lactobacillus</i> sp. SH-1 | 30 °C por 2 d | ↑ capacidad antiinflamatoria | (Mun <i>et al.</i> , 2017) |
| | <i>Sargassum wightii</i> | Karachi, Pakistán | <i>B. licheniformis</i> , <i>A. flavus</i> y <i>A. terreus</i> | Fermentación de sustrato sólido y sumergida 30 °C por 4 d (hongos) 37 °C por 24 h (bacteria) | Enzimas pectinolíticas | (Pervez <i>et al.</i> , 2017) |
| | <i>Undaria pinnatifida</i> | Península de Miura | <i>L. plantarum</i> Miura-SU1 y <i>L. lactis</i> subsp. <i>lactis</i> Miura-SU2 | 30 °C por 2 d | ↑ capacidad antioxidante | (Eda <i>et al.</i> , 2016) |
| | | Península Noto | <i>L. plantarum</i> AN6 y <i>L. lactis</i> subsp. <i>lactis</i> Noto-SU1 | 30 °C por 2 d | ↑ capacidad antioxidante | (Kuda <i>et al.</i> , 2016) |
| | | Bahía de Shizugawa, Miyagi, Japón | <i>L. plantarum</i> Sanriku-SU7 | 30 °C por 3 d | ↑ capacidad antioxidante | (Nemoto <i>et al.</i> , 2017) |
| | | Tokio, Japón | <i>L. brevis</i> , <i>L. plantarum</i> , <i>Lactobacillus casei</i> y <i>Lactobacillus rhamnosus</i> | 20 °C por 11 d | Es posible llevar a cabo su fermentación | (Uchida <i>et al.</i> , 2007) |

Tabla I. Fermentación de macroalgas para la obtención de diversos compuestos (continuación)

| Tipo de algas | Especie | Origen del alga | Microorganismo | Condiciones de fermentación | Resultado obtenido | Referencia |
|---------------|---------------------------------|--|--|--|--|-----------------------|
| Algas rojas | <i>Chondrus elatus</i> | Compradas en Suzuki Nori Co., Choshi, Chiba, Japón | Bacterias ácido lácticas aisladas de la península de Boso, Japón | 30 °C por 5 d | ↑ ORAC, ↑ polifenoles, FRAP y DPPH se mantuvieron constantes | (Takei et al., 2017) |
| | <i>Chondrus ocellatus</i> | Compradas en Suzuki Nori Co., Choshi, Chiba, Japón | Bacterias ácido lácticas aisladas de la península de Boso, Japón | 30 °C por 5 d | ↑ ORAC, ↑ polifenoles, FRAP y DPPH se mantuvieron constantes | (Takei et al., 2017) |
| | <i>Gelidiaser sp</i> | Compradas en Suzuki Nori Co., Choshi, Chiba, Japón | Bacterias ácido lácticas aisladas de la península de Boso, Japón | 30 °C por 5 d | ↑ ORAC, ↑ polifenoles, FRAP y DPPH se mantuvieron constantes | (Takei et al., 2017) |
| | <i>Gloiopeltis furcata</i> | Compradas en Suzuki Nori Co., Choshi, Chiba, Japón | Bacterias ácido lácticas aisladas de la península de Boso, Japón | 30 °C por 5 d | ↑ ORAC, ↑ polifenoles, FRAP y DPPH se mantuvieron constantes | (Takei et al., 2017) |
| | <i>Kappaphycus alvarezii</i> | Compradas en Suzuki Nori Co., Choshi, Chiba, Japón | <i>Kappaphycus alvarezii</i> | Fermentación de sustrato sólido 30 °C por 2-6 d | ↑ polifenoles de 46.93 % para la variedad amarilla, 319.33 % para la variedad verde y 166.29 % la morada. | (Nor et al., 2019) |
| | <i>Pyropia sp.</i> | Compradas en Suzuki Nori Co., Choshi, Chiba, Japón | Bacterias ácido lácticas aisladas de la península de Boso, Japón | 30 °C por 5 d | ↑ ORAC, ↑ polifenoles, FRAP y DPPH se mantuvieron constantes | (Takei et al., 2017) |
| | <i>Pyropia yezoensis</i> | Okayama, Japón | <i>Tetragenococcus halophilus</i> | 23 °C por 2 años | Salsa de algas fermentadas similar a salsa de soya o salsa de pescado | (Uchida et al., 2017) |
| Algas verdes | <i>Codium tomentosum</i> | Karachi, Pakistán | <i>B. licheniformis</i> , <i>A. flavus</i> y <i>A. terreus</i> | Fermentación de sustrato sólido y sumergida 30 °C por 4 d (hongos) 37 °C por 24 h (bacteria) | Enzimas pectinolíticas | (Pervez et al., 2017) |
| | <i>Enteromorpha prolifera</i> | Xiamen, China | <i>L. acidophilus</i> y <i>S. cerevisiae</i> | 30 °C por 5 d | ↑ proteína en alga fermentada, ↑ tamaño de tilapias alimentadas con alga fermentada | (Yang et al., 2016) |
| | <i>Monostroma nitidum</i> | Compradas en Suzuki Nori Co., Choshi, Chiba, Japón | Bacterias ácido lácticas aisladas de la península de Boso, Japón | 30 °C por 5 d | Polifenoles y capacidad antioxidante se mantuvieron constantes | (Takei et al., 2017) |
| | <i>Ulva lactuca</i> | Karachi, Pakistán | <i>B. licheniformis</i> , <i>A. flavus</i> y <i>A. terreus</i> | Fermentación de sustrato sólido y sumergida 30 °C por 4 d (hongos) 37 °C por 24 h (bacteria) | Enzimas pectinolíticas | (Pervez et al., 2017) |
| | <i>Ulva prolifera</i> | Qingdao, China | <i>Catenovulum sp.</i> | 28 °C por 24 h, 400 rpm, pH inicial 7, aeración 1.5 vvm | Enzimas «ulvan» lisas | (Qiao et al., 2020) |
| | | Qingdao, China | <i>Alteromonas sp. A321</i> | 28 °C por 24 h, 400 rpm, aeración 1.5 vvm | ↑ proteína, ↑ polifenoles y ↑ manitol, ↑ tamaño, peso y grado de verde de la concha de abulones alimentados con el alga fermentada | (Chi et al., 2018) |
| | <i>Ulva reticulata</i> Forsskål | Nha Trang, Khanh Hoa, Vietnam | <i>Halomonas sp. BL6</i> | 37 °C por 60 h a 200 rpm | Obtención de piruvato (55.23 g/l) | (Anh et al., 2020) |

Por otra parte, el grupo de trabajo de Shobharani *et al.* (2013) sí pudo llevar a cabo la fermentación. Utilizaron el alga *Sargassum* spp. y obtuvieron 30.09 ± 1.23 µg GAE/mg de polifenoles. También el grupo de Eda *et al.* (2016) tuvieron éxito con la fermentación de algas utilizando *Sargassum horneri*, *S. fusiforme* y *Undaria pinnatifida*, reportaron un contenido final de polifenoles de entre 0.9 y 1.2 µmol PGE/ml. Por otro lado, Kuda *et al.* (2016) reportaron un contenido de polifenoles <1 µmol PGE/ml para *Chorda filum*, 3 µmol PGE/ml para *U. pinnatifida*, y 8 µmol PGE/ml para *Ecklonia stronifera*, resultados mayores a los obtenidos por Eda *et al.* (2016). Mientras que Wijesinghe *et al.* (2012) analizaron el contenido de polifenoles antes y después de fermentar el alga *Ecklonia cava*, observaron que la fermentación tuvo un aumento significativo en el contenido de polifenoles. Asimismo, Nemoto *et al.* (2017) cuantificaron el contenido de polifenoles de distintas partes del alga *U. pinnatifida* antes de fermentarla, las esporofilas fueron la parte que presentó mayor contenido de polifenoles (21.71 ± 1.05 µmol PGE/ml), valores incluso mayores a los obtenidos por Eda *et al.* (2016) y por Kuda *et al.* (2016).

Como ya se ha mencionado, la fermentación incrementa el contenido de polifenoles. Además, se ha observado una relación positiva en el contenido de polifenoles y la capacidad antioxidante, cuantificada como porcentaje de inhibición de DPPH, tal como lo han reportado Shobharani *et al.* (2013), Eda *et al.* (2016) y Kuda *et al.* (2016). Mientras que Kuda *et al.* (2016) reportaron 30 y 85 % de inhibición de DPPH para las algas *U. pinnatifida* y *E. stronifera*, respectivamente; Eda *et al.* (2016) reportaron 40 % de inhibición para todas las muestras analizadas (*S. horneri*, *S. fusiforme* y *U. pinnatifida*). Wijesinghe *et al.* (2012) también mencionan que la capacidad antioxidante, cuantificada como porcentaje de inhibición de DPPH, aumentó de manera proporcional al contenido de polifenoles. Sin embargo, Nemoto *et al.* (2017) obtuvieron resultados contradictorios, en tanto que no observaron cambios visibles en la capacidad antioxidante (cuantificada como porcentaje de inhibición de DPPH). Otro resultado opuesto es el reportado por Takei *et al.* (2017), quienes cuantificaron la capacidad antioxidante mediante el método de ORAC. Ellos relacionaron este resultado a que la capacidad para secuestrar radicales de O₂ puede estar más relacionada con el contenido de polisacáridos que con el de polifenoles (Takei *et al.*, 2017).

Tal como reportan Shobharani *et al.* (2013), la fermentación no solo aumenta la capacidad antioxidante cuantificada como porcentaje de inhibición de DPPH, sino que el efecto quelante de iones férricos también se ve incrementado. Este grupo de autores reportaron que el control presentó 58.6 % de efecto quelante, a diferencia de las muestras fermentadas, que presentaron un valor de 80-84 %. Otra manera de cuantificar la capacidad antioxidante es mediante el método de FRAP, utilizado tanto por Eda *et al.* (2016) como Kuda *et al.* (2016). El valor más bajo reportado fue 0.75 D.O a 700 nm para el alga *U. pinnatifida* (Kuda *et al.*, 2016), mientras que Eda *et al.* (2016) reportaron una D.O a 700 nm para a *U. pinnatifida*, *S. horneri* y *S. fusiforme* de 1.0, 1.5 y 1.5, respectivamente, y el mayor valor obtenido fue 2.25 D.O para *E. stronifera* (Kuda *et al.*, 2016). A pesar de que ambos grupos de trabajo utilizaron la misma alga parda (*U. pinnatifida*), esta no provino del mismo sitio de origen, por lo que es factible inferir que esta puede ser una causa de las variaciones en los resultados obtenidos. Otra diferencia en sus estudios fueron las cepas de microorganismos utilizadas para la fermentación, mientras que Kuda *et al.* (2016) emplearon *L. plantarum* AN6 y *L. lactis* subsp. *lactis* Noto-SU1, Kuda *et al.* (2016), utilizaron *L. plantarum* Miura-SU1 y *L. lactis* subsp. *lactis* Miura-SU2.

Además de estos métodos de capacidad antioxidante, Shobharani *et al.* (2013) también reportaron el potencial reductor, expresado como µg/mg de ácido ascórbico. Este grupo mencionó que el potencial reductor fue 3.5 veces mayor en las muestras control (8.41 ± 0.29 µg/mg de ácido ascórbico) que en las muestras fermentadas (2.43 ± 0.04). Siendo una de las pocas pruebas en las que la capacidad antioxidante no mejoró con la fermentación. Esto se puede relacionar a que los métodos para capacidad antioxidante tienen distintos mecanismos de acción, y durante la fermentación hay compuestos que pueden ser hidrolizados, disminuyendo su capacidad antioxidante. Tanto Kuda *et al.* (2016) como Eda *et al.* (2016) cuantificaron la capacidad antioxidante como actividad secuestradora del radical anión superóxido (O₂⁻) y obtuvieron valores similares, reportando entre 60 y 80 % de inhibición.

2.2. Fermentación de algas rojas

Algunas especies de algas rojas (tabla I) han sido utilizadas para obtener polifenoles con capacidad antioxidante (Takei *et al.*, 2017; Nor *et al.*, 2019) y antiglicante (Eda *et al.*, 2016; Kuda

et al., 2016), así como polisacáridos con actividad anticoagulante (Nikapitiya et al., 2007; Pushpamali et al., 2008) y algunos alimentos, como bebidas fermentadas (Prachyakij et al., 2008), y salsas fermentadas estilo salsa de soya (Uchida et al., 2017) y yogur (Nuñez y Picon, 2017).

Se ha encontrado que a través de la fermentación es posible mejorar la capacidad antioxidante de distintas algas rojas, tal es el caso de Nor et al. (2019), Eda et al. (2016) y Kuda et al. (2016). A diferencia de estos autores, Takei et al. (2017) reportaron que, a pesar de que la capacidad antioxidante mejoró, en la fermentación de las especies de algas rojas que estudiaron no se observaron mejoras en el contenido de polifenoles, corroborado mediante el método de ORAC.

Para la fermentación de algas rojas se han utilizado diferentes microorganismos. Mientras que Nor et al. (2019) emplearon el hongo *Aspergillus oryzae* para llevar a cabo una fermentación de sustrato sólido, la mayoría de los autores han optado por una fermentación ácido láctica utilizando diferentes especies de bacterias. Tanto Takei et al. (2017), como Eda et al. (2016) y Kuda et al. (2016) utilizaron *L. plantarum*, los dos últimos, también utilizaron *Lactococcus lactis*. A pesar de estas diferencias, todos los estudios reportaron un aumento en el contenido de polifenoles y una mejora en la capacidad antioxidante. Esto demuestra que existe más de una especie de microorganismos capaces de llevar a cabo la fermentación de algas de manera exitosa.

A pesar de que Takei et al. (2017), Eda et al. (2016) y Kuda et al. (2016) realizaron el mismo tipo de fermentación, sus resultados muestran diferencias. Takei et al. (2017) reportaron que las algas *Gelidiaser* sp y *Chondrus elatus* tuvieron una baja concentración de polifenoles (< 0.20 y 0.20 mmol PGE/L, respectivamente), mientras que las algas *C. ocellatus*, *Pyropia* sp. y *Gloiopektis furcata* tuvieron una concentración de polifenoles de 0.45, 0.70 y 0.80 mmol PGE/L, respectivamente. Kuda et al. (2016) reportaron <1 µmol PGE/ml para las algas *Gelidium elegans* y *Campylae-phora hypnaeoides*, y 1.6 µmol PGE/ml para el alga *Porphyra* sp. Para el alga *G. elegans*, Eda et al. (2016) reportaron <0.4 µmol PGE/ml, y para el alga *Pyropia* sp., 3.5 µmol PGE/ml. Las diferencias observadas en el contenido de polifenoles del alga *G. elegans* pueden deberse a la región donde el alga fue cosechada, Kuda et al. (2016) obtuvieron sus muestras en la región de la península de Noto y Eda et al. (2016) en la región de la península de Miura.

Se puede observar –al igual que en las algas pardas– una relación en el contenido de polifenoles y la capacidad antioxi-

dante, reportada como porcentaje de inhibición de DPPH. Eda et al. (2016) reportaron <20 % de inhibición de DPPH para *G. elegans* y 60 % de inhibición de DPPH, y Takei et al. (2017) reportaron un porcentaje de inhibición de DPPH de las algas que estudiaron de entre 10 y 40 %, obteniendo mayores valores para las algas con mayor contenido de polifenoles (*Pyropia* sp. y *G. furcata*). Sin embargo, en el estudio de Kuda et al. (2016) no se observa esta relación, sino un valor elevado de polifenoles (3.5 µmol PGE/ml) en el alga *Porphyra* sp., pero el porcentaje de inhibición de DPPH fue <20 %. En cuanto a los resultados de la prueba FRAP, Eda et al. (2016) reportaron el valor más elevado (2.5 D0 a 700 nm) para *Pyropia* sp., mientras que para *G. elegans* reportaron <0.5 D0 a 700 nm, valor similar al observado por Takei et al. (2017) (0.10-0.40 D0 a 700 nm). Adicionalmente, Takei et al. (2017) reportaron valores elevados de inhibición de O2- (50-90 %), cuantificados mediante ORAC, resultado que relacionan con el contenido de polisacáridos y no con el de polifenoles.

Referente a la actividad secuestradora del radical anión superóxido (O2-), Kuda et al. (2016) reportaron una inhibición del 50 % para las algas *G. elegans*, *C. hypnaeoides* y *Porphyra* sp. Eda et al. (2016) reportaron, para la misma prueba, <20 % de inhibición para *G. elegans* y 20 % de inhibición para *Pyropia* sp. Se puede observar que los resultados reportados por Eda et al. (2016) fueron considerablemente más bajos que los reportados por Kuda et al. (2016). Sin embargo, una similitud en los resultados de los tres grupos de autores es que los resultados de ORAC no se relacionan con el contenido de polifenoles, como se ha observado en la inhibición de DPPH, sino que tienen una mayor relación al contenido de otros compuestos solubles en agua –como péptidos y productos obtenidos de reacciones de Maillard generadas durante el secado de las algas– (Takei et al., 2017). Finalmente, Eda et al. (2016) y Kuda et al. (2016) mencionaron que el proceso de fermentación mejora las propiedades antiglicantes de las algas rojas que estudiaron, propiedades que se encuentran relacionadas a la capacidad antioxidante y contenido de polifenoles.

El efecto de la fermentación en términos de contenido de polifenoles y capacidad antioxidante se ve afectado tanto por la especie como por la variedad de alga roja utilizada, tal como se observa en el estudio realizado por Nor et al. (2019). Este grupo de autores utilizó el hongo *Aspergillus oryzae* para fermentar tres variedades del alga roja *Kappaphycus alvarezii*, la

amarilla, verde y morada. Una de las diferencias que se observó es que la variedad amarilla alcanzó su máxima concentración (4.479 mg GAE/g) en el sexto día, mientras que las variedades morada y verde alcanzaron su máxima concentración en el cuarto día (4.037 y 10.022 mg GAE/g, respectivamente). También se puede resaltar que, a pesar de que antes de la fermentación todas las algas presentaron un contenido similar de polifenoles (1.5-2 mg GAE / g), la fermentación favoreció especialmente el aumento en el contenido de polifenoles en la variedad verde. Esta variedad tuvo un aumento del 319.33 %, mientras que las variedades amarilla y morada aumentaron un 46.93 % y 166.29 %, respectivamente. Estas diferencias podrían deberse a los pigmentos de cada variedad de alga y a cómo estos afectan el rendimiento de los microorganismos fermentadores.

A diferencia del contenido de polifenoles, la capacidad antioxidante reportada como porcentaje de inhibición de DPPH mostró una tendencia similar para las tres variedades. La capacidad antioxidante aumentó gradualmente hasta el cuarto día, para después disminuir. Sin embargo, la variedad verde fue la que presentó mayor inhibición del radical DPPH (72.47 %). Tanto en esta variedad como en la morada se observó una fuerte correlación entre el contenido de polifenoles y la capacidad antioxidante, $R^2 = 0.951$ y $R^2 = 0.823$ ($p < 0.01$), a diferencia de la variedad amarilla, que mostró una correlación menor ($R^2 = 0.441$). Otros autores han demostrado que es posible obtener polisacáridos sulfatados con capacidad anticoagulante mediante la fermentación de las algas. Nikapitiya *et al.* (2007) utilizaron el alga roja *Grateloupia filicina*, mientras que Pushpamali *et al.* (2008) utilizaron las algas *Lomentaria catenata*, *Gracilaria verrucosa*, *Gloiopeletis furcata* y *Gracilaria textorii*. En ambos estudios, los autores realizaron una fermentación «natural» por 10 semanas. Para ello, mezclaron alga con sacarosa y agua, e incubaron la mezcla a 25 °C. Nikapitiya *et al.* (2007) encontraron que el tiempo de tromboplastina parcial (APTT) aumentaba de manera significativa ($p < 0.05$) con el tiempo de fermentación hasta la sexta semana y después disminuía. De acuerdo con Pushpamali *et al.* (2008), las algas obtuvieron su mayor tiempo de APTT en menor tiempo (cuarta semana) y no hubo disminución con el transcurso de las semanas, como lo reportaron Nikapitiya

et al. (2007). De igual manera, se pueden observar diferencias en el tiempo de coagulación, siendo menor para *G. verrucosa* con 38.6 segundos (Pushpamali *et al.*, 2008), *G. textorii* con 49.1 (Pushpamali *et al.*, 2008), *G. furcata* con 51.7 (Pushpamali *et al.*, 2008), seguidas de *G. filicina* con 800 segundos (Nikapitiya *et al.*, 2007). El alga que presentó el mayor tiempo de coagulación en la prueba de APTT fue *L. catenata* con >1000 segundos (Pushpamali *et al.*, 2008). Todas las algas presentaron mayor tiempo de coagulación que los controles utilizados (36.8 segundos). Los autores de ambos estudios mencionan que, con la fermentación, el contenido de galactanos sulfatados aumenta, teniendo como consecuencia un incremento en la actividad anticoagulante de las algas (Nikapitiya *et al.*, 2007; Pushpamali *et al.*, 2008).

2.3. Fermentación de algas verdes

Las algas verdes han ganado atención como fuente renovable para la obtención de diversos productos. A pesar del gran potencial de estas algas, su utilización se ha limitado mayormente a la producción de etanol (Anh *et al.*, 2020). Sin embargo, algunos autores han estudiado la posibilidad de obtener diversos compuestos valiosos. Este es el caso de Anh *et al.* (2020), quienes analizaron la obtención de piruvato mediante la fermentación de varias algas (tabla I), entre ellas *Ulva lactuca*. Mientras que Chi *et al.* (2018) usaron el alga *Ulva prolifera* para examinar el efecto de su fermentación en el crecimiento de abulón. La fermentación de algas verdes (*Enteromorpha prolifera*) también ha sido utilizada para mejorar el crecimiento de tilapia, como estudiaron Yang *et al.* (2016).

Vemos que la fermentación de algas verdes no se ha enfocado en la obtención de compuestos bioactivos. Solo un grupo de investigación (Takei *et al.*, 2017) ha estudiado el uso de algas verdes (*Monostroma nitidum* y *Ulva* sp. [tabla I]) para mejorar su capacidad antioxidante. El contenido de polifenoles de ambas algas fue <0.2 mmol PGE/l, el porcentaje de inhibición de DPPH (20 %), y los resultados del FRAP (<0.2 D0 a 700 nm), valores que los autores consideraron muy bajos. Sin embargo, presentaron buen porcentaje de inhibición de O₂·- (ORAC), 60 y 90 % para *M. nitidum* y *Ulva* sp., respectivamente. Únicamente fue posible realizar la fermentación de *M. nitidum*.

3. Fermentación de microalgas para la obtención de compuestos bioactivos

La mayoría de los estudios observan la fermentación de la microalga *A. platensis*, también conocida como Spirulina. Distintos autores se han enfocado en mejorar su perfil bioactivo mediante el aumento de la capacidad antioxidante (Choi *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2018; De Marco Castro *et al.*, 2019; Niccolai *et al.*, 2019), así como en disminuir el aroma y los off-flavors de la micro-

alga, los cuales dificultan su utilización (Bao *et al.*, 2018). Otra microalga que ha sido estudiada es *Pavlovia lutheri*. Esta se ha empleado para obtener péptidos bioactivos, así como para estudiar su capacidad antioxidante en macrófagos de ratón y células humanas. En la tabla II se pueden observar las microalgas más estudiadas, así como los microorganismos utilizados para su fermentación, las condiciones del proceso de la fermentación y el resultado obtenido.

Tabla II. Fermentación de microalgas para la obtención de diversos compuestos

| Especie | Microorganismo | Condiciones de fermentación | Resultado obtenido | Referencia |
|--------------------------------|---|---|---|--|
| <i>Arthrosphaera platensis</i> | <i>Lactobacillus plantarum</i> , <i>Lactobacillus acidophilus</i> y <i>Bacillus subtilis</i> | 37 °C por 24 h | ↑ hidrolisis proteica (30 %), mejora del perfil de aroma y color | (Bao <i>et al.</i> , 2018) |
| | <i>L. plantarum</i> ATCC 8014 | 37 °C por 72 h | ↑ polifenoles, ↑ capacidad antioxidante | (Niccolai <i>et al.</i> , 2019) |
| | <i>L. plantarum</i> | 37 °C por 72 h | ↑ polifenoles, ↑ capacidad antioxidante, ↑ metionina libre | (De Marco Castro <i>et al.</i> , 2019) |
| | <i>L. plantarum</i> HY-08 | 37 °C por 96 h | ↑ carotenoides, ↑ capacidad antioxidante y perfil neuroprotectorivo | (Choi <i>et al.</i> , 2018) |
| <i>Pavlova lutheri</i> | <i>Hansenula polymorpha</i> | 37 °C por 3, 6 y 12 d | ↑ capacidad antioxidante modificación del perfil de aminoácidos | (Qian <i>et al.</i> , 2012) |
| | <i>Candidia rugopelliculosa</i> | 33.57 °C, 236.38 rpm, pH 6.17 y 23.82 h | Péptidos de cadena corta | (Ryu <i>et al.</i> , 2012) |

Algunos autores, como Qian *et al.* (2012), Ryu *et al.* (2012) y Bao *et al.* (2018), han reportado cambios en el perfil de aminoácidos. A pesar de que Qian *et al.* (2012) y Ryu *et al.* (2012) utilizaron la misma microalga (*P. lutheri*) para sus estudios, no utilizaron los mismos microorganismos para llevar a cabo su fermentación; *Hansenula polymorpha* en el caso de Qian *et al.* (2012) y *Candidia rugopelliculosa* en el caso de Ryu *et al.* (2012). Esta diferencia puede ser una de las causas de que presenten resultados opuestos en el perfil de aminoácidos del alga fermentada. En ambos casos se reportaron aumentos en el ácido aspártico, arginina, fenilalanina, prolina, histidina y tirosina. Así como disminuciones en el contenido de lisina, isoleucina, treo-

nina y ácido glutámico. Sin embargo, Qian *et al.* (2012) reportaron un aumento en alanina, valina, leucina y prolina; con una disminución en serina y glicina. Mientras que Ryu *et al.* (2012) reportaron un aumento en serina, glicina, metionina, cisteína y triptófano, y una disminución en alanina, valina y leucina. A pesar de estas diferencias, coincidieron en observar una mejora en la capacidad antioxidante del alga fermentada.

Otro estudio realizado por Bao *et al.* (2018) analizó el cambio en el perfil de aminoácidos en *A. platensis*, reportando que, al realizar una fermentación acido-láctica, se observó un aumento en el contenido de arginina y una disminución en alanina y ácido glutámico. Estos autores también mencionan que, al

fermentar la microalga, el contenido de lípidos totales disminuyó; sin embargo, el contenido de ácidos grasos aumentó de 6 a 19 %. Adicionalmente, la microalga cambió de verde oscuro a un verde claro y el aroma mejoró.

Bao *et al.* (2018) utilizaron 2 cepas de *L. plantarum*, 2 cepas de *L. acidophilus* y una cepa de *Bacillus subtilis*, obteniendo los mejores resultados al combinar una cepa de *L. plantarum* y *B. subtilis* para la fermentación de *A. platensis*. A diferencia de Bao *et al.* (2018), otros autores que han realizado fermentación ácido-láctica en *A. platensis* únicamente han utilizado *L. plantarum* (Choi *et al.*, 2018; De Marco Castro *et al.*, 2019; Niccolai *et al.*, 2019). Todos ellos registraron resultados similares, con un aumento en el contenido de polifenoles (De Marco Castro *et al.*, 2019; Niccolai *et al.*, 2019) y de carotenoides (Choi *et al.*, 2018), así como una mejora en la capacidad antioxidante.

Niccolai *et al.* (2019) reportaron que el contenido de polifenoles aumentó de 4.5 a 18.9 mg GAE/g después de dos días de fermentación y, después de 72 horas, disminuyó a 10.9 mg GAE/g. Por su parte, De Marco Castro *et al.* (2019) reportaron que el mayor contenido de polifenoles se dio a las 36 horas, con un 17.87 ± 0.77 mg GAE/g, resultado similar al obtenido por Niccolai *et al.* (2019). Además, De Marco Castro *et al.* (2019) observaron el mayor contenido de ficocianina (187.0 ± 3.79 μ g de ficocianina/mg) a las 36 horas; mientras que Choi *et al.* (2018) se enfocaron en el contenido de carotenoides y reportaron que este fue mayor cuando el alga fue fermentada (1.62 ± 0.22 mg/g).

En cuanto a la capacidad antioxidante, reportada como inhibición de DPPH, Niccolai *et al.* (2019) reportaron que mejoró, de 20.5 ± 1.7 a 36.6 ± 1.2 % al finalizar las 72 horas. Además, identificaron dos compuestos (ácido láctico L-3-[4-hidroxifenil] y ácido láctico L-indol-3) producidos por *L. plantarum*, que presentaron propiedades antioxidantes, concluyendo que sea una de las posibles causas de la mejora en la capacidad an-

tioxidante de la microalga fermentada. Por su parte, De Marco Castro *et al.* (2019) obtuvieron la mayor inhibición de DPPH (21.00 ± 0.8 %) a las 24 horas. Además, cuantificaron la capacidad antioxidante mediante FRAP y ORAC, registrando los valores más elevados de FRAP y ORAC a las 36 horas, 482.00 ± 6.02 μ g TE/g (b.s.) y 66.14 ± 1.09 μ mol TE/g (b.s.), respectivamente. Mientras que Choi *et al.* (2018) observaron un 49.01 % de inhibición de DPPH, el cual es considerablemente mayor al reportado por los otros autores (De Marco Castro *et al.*, 2019; Niccolai *et al.*, 2019).

4. Fermentación de macroalgas para la obtención de enzimas

Se ha observado la obtención de enzimas mediante fermentación en algas pardas (Pervez *et al.*, 2017), rojas (Nor *et al.*, 2019) y verdes (Rodríguez-Jasso *et al.*, 2013; Pervez *et al.*, 2017; Qiao *et al.*, 2020). Para ello, las algas funcionan como sustrato. Las enzimas obtenidas pueden tener diversos fines; las proteasas alcalinas son empleadas como detergente (Abidi *et al.*, 2008), para la obtención de etanol para biocombustibles (Zhang *et al.*, 2018) o para desarrollar fertilizantes agroquímicos (Wang *et al.*, 2016).

Todos los grupos de autores concuerdan en la importancia de controlar las condiciones de fermentación, como el pH inicial, la temperatura y el tiempo. Adicionalmente, algunos han estudiado la agitación, concentración inicial de sustrato y pretratamiento del alga. Sin embargo, la mayoría reporta diferencias en cuanto a las condiciones óptimas para la producción de enzimas. Los valores reportados del pH inicial en los diferentes sistemas de fermentación se encuentran en un rango de 5-7 (Pervez *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2019; Qiao *et al.*, 2020). Estas diferencias de pH pueden estar relacionadas con el microorganismo empleado para la fermentación, ya que las bacterias (*Catenovolum* sp. LP y *Bacillus licheniformis* KIBGE-IB4) por lo general tienen un mejor desarrollo en ambientes neutros y alcalinos, a diferencia

de los hongos y levaduras (*Meyerozyma guilliermondii*) que prefieren un ambiente ligeramente ácido (tabla I). Otro factor importante es la temperatura de fermentación, la cual puede estar relacionada con el tipo de microorganismo empleado, así como la enzima objetivo de cada investigación. Pervez *et al.* (2017) determinaron que la temperatura óptima en su estudio fue 37 °C, mientras que Qiao *et al.* (2020) obtuvieron mejores resultados al iniciar la fermentación a 32 °C y después disminuirla a 28 °C.

Para la obtención de las enzimas celulasa, xilanasa y β -glucosidasa, así como diferentes compuestos bioactivos, Nor *et al.* (2019) estudiaron tres variedades del alga roja *K. alvarezii*. Todas mostraron una tendencia similar en la producción de enzimas, sin embargo, a diferencia del contenido de polifenoles y capacidad antioxidante, donde la variedad amarilla presentó los valores más bajos, esta variedad presentó el mayor contenido de celulasa (270 U/ml) y de xilanasa (75 U/ml). La variedad verde presentó el mayor contenido de polifenoles y porcentaje de inhibición de DPPH, así como los valores más bajos de xilanasa y celulasa (50 y 150 U/ml, respectivamente). La β -glucosidasa fue la única enzima en la que no se observó esta tendencia, con 14 U/ml, a diferencia de la variedad amarilla, que presentó 11 U/ml, y la variedad morada, 8 U/ml. Estas diferencias se atribuyen a que la β -glucosidasa puede estar relacionada con la liberación de compuestos fenólicos.

La fermentación para la obtención de enzimas puede llevarse a cabo mediante sustrato sólido (SSF, por sus siglas en inglés), es decir en una matriz sólida con bajo contenido de agua libre, o sumergida (SMF, por siglas en inglés) (tabla I). Si bien varios autores han obtenido resultados exitosos con la fermentación SSF, Pervez *et al.* (2017) compararon ambos (SSF y SMF), y observaron un mayor contenido de pectinasa al utilizar fermentación sumergida (2500 U/mg) en comparación con la fermentación de sustrato sólido (1500 U/mg). Encontraron que el microorga-

nismo (*Bacillus licheniformis KIBGE-IB4*) se desarrollaba con mayor velocidad en un medio líquido en comparación de un medio sólido, lo que favorecía la producción de enzimas.

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Las macro y microalgas son organismos mediante los cuales se pueden obtener diversos compuestos. La mayoría de los estudios han demostrado que la fermentación ácido-láctica puede ser muy útil, ya que puede ser utilizada para casi todas las algas, tanto micro como macroalgas. También vemos que es posible utilizar distintos hongos o levaduras. El microorganismo a utilizar dependerá del objetivo de la fermentación y las características del alga. Mientras que la mayoría de los autores se han enfocado en el contenido de polifenoles y su capacidad antioxidante, también se ha demostrado que es posible obtener polisacáridos, los cuales también pueden presentar actividad bioactiva. De igual manera, se han utilizado las algas como sustrato para la obtención de enzimas. Sin embargo, se puede observar que es un área en la que hay un gran potencial para mayores investigaciones, ya que la mayoría de los estudios hasta el momento se han enfocado en la utilización de las algas pardas y de la microalga *A. platensis*.

AGRADECIMIENTOS

La autora A. Pérez-Alva 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 para sus estudios de doctorado.

REFERENCIAS

- Abidi, F., Limam, F. y Nejib, M. M. (2008). «Production of alkaline proteases by *Botrytis cinerea* using economic raw materials: Assay as biodetergents». *Process Biochemistry*, 43(11), 1202-1208. <https://doi.org/10.1016/j.procb.2008.06.018>
- Abidov, M., Ramazanov, Z., Seifulla, R. y Grachev, S. (2010). «The effects of XanthigenTM in the weight management of obese premenopausal women with non-alcoholic fatty liver disease and normal liver fat». *Diabetes, Obesity and Metabolism*, 12(1), 72-81. <https://doi.org/10.1111/j.1463-1326.2009.01132.x>
- Amorim, K., Lage-Yusti, M.-A. y López-Hernández, J. (2012). «Changes in bioactive compounds content and antioxidant activity of seaweed after cooking processing». *CyTA - Journal of Food*, 10(4), 321-324. <https://doi.org/10.1080/19476337.2012.658871>
- Amorim-Carrilho, K., Lage-Yusti, M. A. y López-Hernández, J. (2014). «Variation of bioactive compounds in dried seaweed *Himanthalia elongata* subjected to different culinary processes». *CyTA - Journal of Food*, 12(4), 336-339. <https://doi.org/10.1080/19476337.2013.877082>
- Andrade, L., De Andrade, C. J., Dias, M., Nascimento, C. y Mendes, M. (2018). «*Chlorella* and *Spirulina* Microalgae as sources of functional foods, nutraceuticals, and food supplements; an overview». *MOJ Food Processing & Technology*, 6(1), 00144.
- Anh, H. T. L., Kawata, Y., Tam, L. T., Thom, L. T., Ha, N. C., Hien, H. T. M., Thu, N. T. H., Huy, P. Q. y Hong, D. D. (2020). «Production of pyruvate from *Ulva reticulata* using the alkophilic, halophilic bacterium *Halomonas sp. BL6*». *Journal of Applied Phycology*, 32, 2283-2293. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02035-1>
- Bao, J., Zhang, X., Zheng, J.-H., Ren, D.-F. y Lu, J. (2018). «Mixed fermentation of *Spirulina platensis* with *Lactobacillus plantarum* and *Bacillus subtilis* by random-centroid optimization». *Food Chemistry*, 264, 64-72. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.05.027>
- Cha, J.-Y., Lee, B.-J., Je, J.-Y., Kang, Y.-M., Kim, Y.-M. y Cho, Y.-S. (2011). «GABA-enriched fermented *Laminaria japonica* protects against alcoholic hepatotoxicity in sprague-dawley rats». *Fisheries and aquatic sciences*, 14(2), 79-88. <https://doi.org/10.5657/FAS.2011.0079>
- Chi, Y., Qiao, L., Zuo, S., Yan, H., Du, C., Hwang, H. y Wang, P. (2018). «Submerged liquid fermentation of *Ulva prolifera* Müller tissue and applications for improving growth performance in juvenile abalone (*Haliotis discus hannai* Ino)». *Journal of Applied Phycology*, 30(4), 2639-2647. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1413-6>
- Choi, W. Y., Kang, D. H., Heo, S.-J. y Lee, H. Y. (2018). «Enhancement of the neuro-protective effect of fermented *Spirulina maxima* associated with antioxidant activities by ultrasonic extraction». *Applied Sciences*, 8(12), 2469. <https://doi.org/10.3390/app8122469>
- Chye, F. Y., Ooi, P. W., Ng, S. Y. y Sulaiman, M. R. (2018). «Fermentation-derived bioactive components from seaweeds: functional properties and potential applications». *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 27(2), 144-164. <https://doi.org/10.1080/10498850.2017.1412375>
- De Freitas Coêlho, D., Lacalendola Tundisi, L., Santos Cerqueira, K., Da Silva Rodrigues, J. R., Gava Mazzola, P., Basile Tambourgi, E. y Rodrigues de Souza, R. (2019). «Microalgae: cultivation aspects and bioactive compounds». *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 62, e19180343. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2019180343>
- De Marco Castro, E. de M., Shannon, E. y Abu-Ghannam, N. (2019). «Effect of fermentation on enhancing the nutraceutical properties of *Arthrosphaera platensis* (spirulina)». *Fermentation-Basel*, 5(1), 28. <https://doi.org/10.3390/fermentation5010028>
- De Zoysa, M., Nikapitiya, C., Jeon, Y.-J., Jee, Y. y Lee, J. (2008). «Anticoagulant activity of sulfated polysaccharide isolated from fermented brown seaweed *Sargassum fulvellum*». *Journal of Applied Phycology*, 20(1), 67-74. <https://doi.org/10.1007/s10811-007-9182-7>
- Eda, M., Kuda, T., Kataoka, M., Takahashi, H. y Kimura, B. (2016). «Anti-glycation properties of the aqueous extract solutions of dried algae products harvested and made in the Miura Peninsula, Japan, and effect of lactic acid fermentation on the properties». *Journal of Applied Phycology*, 28(6), 3617-3624. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-0891-7>
- Erkmen, O. y Bozoglu, T. F. (2016). «Basic principles of food fermentation». En Erkmen, O. y Bozoglu, T. F., *Food Microbiology: Principles into Practice* (pp. 228-252). India Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119237860.ch39>
- Gupta, S., Abu-Ghannam, N. y Scannell, A. G. M. (2011). «Growth and kinetics of *Lactobacillus plantarum* in the fermentation of edible Irish brown seaweeds». *Food and Bioproducts Processing*, 89(4), 346-355. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2010.10.001>

- Hamed, I., Özogul, F., Özogul, Y. y Regenstein, J. M. (2015). «Marine bioactive compounds and their health benefits: a review». *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(4), 446-465. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12136>
- Kang, Y. M., Lee, B.-J., Kim, J. I., Nam, B.-H., Cha, J.-Y., Kim, Y.-M., Ahn, C.-B., Choi, J.-S., Choi, I. S. y Je, J.-Y. (2012). «Antioxidant effects of fermented sea tangle (*Laminaria japonica*) by *Lactobacillus brevis* Bj20 in individuals with high level of γ -GT: a randomized, double-blind, and placebo-controlled clinical study». *Food and Chemical Toxicology*, 50(3-4), 1166-1169. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2011.11.026>
- Kang, Y.-M., Qian, Z.-J., Lee, B.-J. y Kim, Y.-M. (2011). «Protective effect of GABA-enriched fermented sea tangle against ethanol-induced cytotoxicity in HepG2 Cells». *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 16(5), 966-970. <https://doi.org/10.1007/s12257-011-0154-z>
- Kim, S. K. (Ed.). (2011). *Handbook of Marine Macroalgae: Biotechnology and Applied Phycology*. India: John Wiley & Sons.
- Kuda, T., Eda, M., Kataoka, M., Nemoto, M., Kawahara, M., Oshio, S., Takahashi, H. y Kimura, B. (2016). «Anti-glycation properties of the aqueous extract solutions of dried algae products and effect of lactic acid fermentation on the properties». *Food Chemistry*, 192, 1109-1115. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.07.073>
- Lee, B.-J., Kim, J.-S., Kang, Y. M., Lim, J.-H., Kim, Y.-M., Lee, M.-S., Jeong, M.-H., Ahn, C.-B. y Je, J.-Y. (2010). «Antioxidant activity and γ -aminobutyric acid (GABA) content in sea tangle fermented by *Lactobacillus brevis* Bj20 isolated from traditional fermented foods». *Food Chemistry*, 122(1), 271-276. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.02.071>
- Lee, W., Ahn, G., Lee, B.-J., Wijesinghe, W. a. J. P., Kim, D., Yang, H., Kim, Y. M., Park, S. J., Jee, Y. y Jeon, Y.-J. (2013). «Radio-protective effect of polysaccharides isolated from *Lactobacillus brevis*-fermented *Ecklonia cava*». *International Journal of Biological Macromolecules*, 52, 260-266. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2012.10.004>
- Lee, W.-W., Ahn, G., Wijesinghe, W. A. J. P., Yang, X., Ko, C.-I., Kang, M.-C., Lee, B.-J. y Jeon, Y.-J. (2011). «Enzyme-assisted extraction of *Ecklonia cava* fermented with *Lactobacillus brevis* and isolation of an anti-inflammatory polysaccharide». *Algae*, 26(4), 343-350. <https://doi.org/10.4490/algae.2011.26.4.343>
- Leyton, A., Flores, L., Mäki-Arvela, P., Lienqueo, M. E. y Shene, C. (2019). «*Macrocystis pyrifera* source of nutrients for the production of carotenoids by a marine yeast *Rhodotorula mucilaginosa*». *Journal of Applied Microbiology*, 127(4), 1069-1079. <https://doi.org/10.1111/jam.14362>
- Li, S.-Y., Wang, Z.-P., Wang, L.-N., Peng, J.-X., Wang, Y.-N., Han, Y.-T. y Zhao, S.-F. (2019). «Combined enzymatic hydrolysis and selective fermentation for green production of alginic oligosaccharides from *Laminaria japonica*». *Bioresource Technology*, 281, 84-89. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.056>
- Lin, H.-T. V., Lu, W.-J., Tsai, G.-J., Chou, C.-T., Hsiao, H.-I. y Hwang, P.-A. (2016). «Enhanced anti-inflammatory activity of brown seaweed *Laminaria japonica* by fermentation using *Bacillus subtilis*». *Process Biochemistry*, 51(12), 1945-1953. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2016.08.024>
- Martins, S., Mussatto, S. I., Martínez-Avila, G., Montañez-Saenz, J., Aguilar, C. N. y Teixeira, J. A. (2011). «Bioactive phenolic compounds: production and extraction by solid-state fermentation. A review». *Biotechnology Advances*, 29(3), 365-373. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.01.008>
- Mun, O.-J., Kwon, M. S., Karadeniz, F., Kim, M., Lee, S.-H., Kim, Y.-Y., Seo, Y., Jang, M.-S., Nam, K.-H. y Kong, C.-S. (2017). «Fermentation of *Sargassum thunbergii* by kimchi-derived *Lactobacillus* sp. SH-1 attenuates LPS-stimulated inflammatory response via downregulation of JNK». *Journal of Food Biochemistry*, 41(2), e12306. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12306>
- Navarrete-Bolaños, J. L. (2012). «Improving traditional fermented beverages: how to evolve from spontaneous to directed fermentation». *Engineering in Life Sciences*, 12(4), 410-418. <https://doi.org/10.1002/elsc.201100128>
- Nemoto, M., Kuda, T., Eda, M., Yamakawa, H., Takahashi, H. y Kimura, B. (2017). «Protective Effects of Mekabu aqueous solution fermented by *Lactobacillus plantarum* sanriku-su7 on human enterocyte-like HT-29-luc cells and DSS-induced murine IBD model». *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 9(1), 48-55. <https://doi.org/10.1007/s12602-016-9226-x>
- Niccolai, A., Shannon, E., Abu-Ghannam, N., Biondi, N., Rodolfi, L. y Tredici, M. R. (2019). «Lactic acid fermentation of *Arthrosphaera platensis* (spirulina) biomass for probiotic-based products». *Journal of Applied Phycology*, 31(2), 1077-1083. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1602-3>
- Nicoletti, M. (2016). «Microalgae nutraceuticals». *Foods*, 5(3), 54. <https://doi.org/10.3390/foods5030054>
- Nikapitiya, C., Zoysa, M. D., Jeon, Y.-J., Lee, J. y Jee, Y. (2007). «Isolation of sulfated anticoagulant compound from fermented red seaweed *Grateloupa filicina*». *Journal of the World Aquaculture Society*, 38(3), 407-417. <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.2007.00112.x>

- Nor, N. M., Haiyee, Z. A., Razak, W. R. W. A. y Muhammad, S. K. S. (2019). «Enhancement and bioavailability of phenolic content in *Kappaphycus alvarezii* through solid substrate fermentation». *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 15(6), 867-871. <https://doi.org/10.11113/mjfas.v15n6.1455>
- Nuñez, M. y Picon, A. (2017). «Seaweeds in yogurt and quark supplementation: influence of five dehydrated edible seaweeds on sensory characteristics». *International Journal of Food Science & Technology*, 52(2), 431-438. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13298>
- Oh, H. J., Kim, K.-Y., Lee, K. M., Lee, S.-M., Gong, G., Oh, M.-K. y Um, Y. (2019). «Enhanced butyric acid production using mixed biomass of brown algae and rice straw by *Clostridium tyrobutyricum* ATCC25755». *Bioresource Technology*, 273, 446-453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.11.037>
- Paul, S. N. A., Tseng, C. K. y Borowitzka, M. M. (2013). «Seaweed and microalgae». En J. S. Lucas y P. C. Southgate, *Aquaculture: Farming Aquatic Animals and Plants* (pp. 268-293). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/978118687932.ch13>
- Pervez, S., Shahid, F., Aman, A. y Qader, S. A. U. (2017). «Algal biomass: a sustainable, economical and renewable approach for microbial production of pectinolytic enzymes using submerged and solid state fermentation techniques». *Biocatalysis and Biotransformation*, 35(6), 442-449. <https://doi.org/10.1080/10242422.2017.1364731>
- Prachyakij, P., Charernjiratrakul, W. y Kantachote, D. (2008). «Improvement in the quality of a fermented seaweed beverage using an antiyeast starter of *Lactobacillus plantarum* DW3 and partial sterilization». *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 24(9), 1713-1720. <https://doi.org/10.1007/s11274-008-9662-1>
- Pushpamali, W. A., Nikapitiya, C., Zoysa, M. D., Whang, I., Kim, S. J. y Lee, J. (2008). «Isolation and purification of an anticoagulant from fermented red seaweed *Lomentaria catenata*». *Carbohydrate Polymers*, 73(2), 274-279. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.11.029>
- Qian, Z.-J., Jung, W.-K., Kang, K.-H., Ryu, B., Kim, S.-K., Je, J.-Y., Heo, S.-J., Oh, C., Kang, D.-H., Park, W. S. y Choi, I.-W. (2012). «In vitro antioxidant activities of the fermented marine microalga *Pavlova lutheri* (haptophyta) with the yeast *Hansenula polymorpha*». *Journal of Phycology*, 48(2), 475-482. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2012.01117.x>
- Qiao, L., Yang, X., Xie, R., Du, C., Chi, Y., Zhang, J. y Wang, P. (2020). «Efficient production of ulvan lyase from *Ulva prolifera* by *Catenovulum* sp. LP based on stage-controlled fermentation strategy». *Algal Research*, 46, 101812. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.101812>
- Rodríguez-Jasso, R. M., Mussatto, S. I., Sepúlveda, L., Agrasar, A. T., Pastrana, L., Aguilar, C. N. y Teixeira, J. A. (2013). «Fungal fucoidanase production by solid-state fermentation in a rotating drum bioreactor using algal biomass as substrate». *Food and Bioproducts Processing*, 91(4), 587-594. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.02.004>
- Ryu, B., Kang, K.-H., Ngo, D.-H., Qian, Z.-J. y Kim, S.-K. (2012). «Statistical optimization of microalgae *Pavlova lutheri* cultivation conditions and its fermentation conditions by yeast, *Candida rugopelliculosa*». *Bioresource Technology*, 107, 307-313. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.12.014>
- Ścieszka, S. y Klewicka, E. (2018). «Algae in food: a general review». *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(21), 1-10. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1496319>
- Shobharani, P., Halami, P. M. y Sachindra, N. M. (2013). «Potential of marine lactic acid bacteria to ferment *Sargassum* sp. For enhanced anticoagulant and antioxidant properties». *Journal of Applied Microbiology*, 114(1), 96-107. <https://doi.org/10.1111/jam.12023>
- Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E. y Isambert, A. (2006). «Commercial applications of microalgae». *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 101(2), 87-96. <https://doi.org/10.1263/jbb.101.87>
- Takei, M., Kuda, T., Eda, M., Shikano, A., Takahashi, H. y Kimura, B. (2017). «Antioxidant and fermentation properties of aqueous solutions of dried algal products from the Boso Peninsula, Japan». *Food Bioscience*, 19, 85-91. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2017.06.006>
- Tanna, B. y Mishra, A. (2018). «Metabolites unravel nutraceutical potential of edible seaweeds: an emerging source of functional food». *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(6), 1613-1624. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12396>
- Tebbani, S., Lopes, F., Filali, R., Dumur, D. y Pareau, D. (2014). «Microalgae». En S. Tebbani et al., *CO₂ Biofixation by Microalgae* (pp. 1-22). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/978118984475.ch1>
- Uchida, M., Kurushima, H., Ishihara, K., Murata, Y., Touhata, K., Ishida, N., Niwa, K. y

- Araki, T. (2017). «Characterization of fermented seaweed sauce prepared from nori (*Pyropia yezoensis*)». *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 123(3), 327-332. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2016.10.003>
- Uchida, M. y Miyoshi, T. (2013). Algal fermentation—The seed for a new fermentation industry of foods and related products. *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ*, 47(1), 53-63. <https://doi.org/10.6090/jarq.47.53>
- Uchida, M., Murata, M. y Ishikawa, F. (2007). «Lactic acid bacteria effective for regulating the growth of contaminant bacteria during the fermentation of *Undaria pinnatifida* (Phaeophyta)». *Fisheries Science*, 73(3), 694-704. <https://doi.org/10.1111/j.1444-2906.2007.01383.x>
- Wang, M., Chen, L., Liu, Z., Zhang, Z., Qin, S. y Yan, P. (2016). «Isolation of a novel alginate lyase-producing *Bacillus litoralis* strain and its potential to ferment *Sargassum horneri* for biofertilizer». *MicrobiologyOpen*, 5(6), 1038-1049. <https://doi.org/10.1002/mbo3.382>
- Wang, S., Yang, R., Li, H., Jiang, J., Zhang, L., Zhang, Q. y Li, P. (2018). «Evaluation and comparison of in vitro antioxidant activities of unsaponifiable fraction of 11 kinds of edible vegetable oils». *Food Science & Nutrition*, 6(8), 2355-2362. <https://doi.org/10.1002/fsn3.823>
- Wijesinghe, W. A. J. P., Won-Woo, L., Young-Mog, K., Young-Tae, K., Se-Kwon, K., Byong-Tae, J., Jin-Soo, K., Min-Soo, H., Won-Kyo, J., Ahn, G., Lee, K.-W. y Jeon, Y.-J. (2012). «Value-added fermentation of *Ecklonia cava* processing by-product and its antioxidant effect». *Journal of Applied Phycology*, 24(2), 201-209. <https://doi.org/10.1007/s10811-011-9668-1>
- Yang, H., Li, Z.-B., Chen, Q., Li, W.-J., Sun, Y.-Z. y Lu, J. (2016). «Effect of fermented *Enteromopha prolifera* on the growth performance, digestive enzyme activities and serum non-specific immunity of red tilapia (*Oreochromis mossambicus* × *Oreochromis niloticus*)». *Aquaculture Research*, 47(12), 4024-4031. <https://doi.org/10.1111/are.12856>
- Zhang, W., Xia, X. y Zhang, Z. (2019). «Alginate lyase of a novel algae fermentation strain». *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 33, 125-131. <https://doi.org/10.15255/CABEQ.2018.1291>
- Zhang, W., Zhang, Z., Bao, L., Zang, X. y Cui, H. (2018). «Alcohol dehydrogenase of a novel algae fermentation strain *Meyerozyma guilliermondii*». *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 32(1), 117-123. <https://doi.org/10.15255/CABEQ.2016.836>



Oleogeles basados en biopolímeros como sustitutos de lípidos saturados en productos alimentarios

J. C. Metri-Ojeda*, D. K. Baigts-Allende y M. M. Ramírez-Rodrigues

*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos
Correo electrónico: jorge.metrioa@udlap.mx

RESUMEN

Los lípidos, en especial los saturados, son un ingrediente fundamental en la elaboración de productos alimentarios, ya que pueden desarrollar características sensoriales (textura y palatabilidad) deseadas. Sin embargo, el consumo excesivo de lípidos saturados ha sido relacionado con el desarrollo de enfermedades cardiovasculares. Por ello, la industria alimentaria tiene un gran interés por reducir los lípidos saturados en productos alimentarios. Una alternativa novedosa es la utilización de aceites gelificados (oleogeles) mediante el uso de biopolímeros. Los oleogeles basados en biopolímeros han sido usados en diferentes productos (panadería, chocolates y cárnicos), no obstante, es importante determinar el efecto de su incorporación en las propiedades físicas de los productos, ya que estas determinan en gran medida su aceptabilidad. El objetivo de esta revisión es explorar los métodos para desarrollar oleogeles utilizando biopolímeros, así como sus características, aplicaciones y efectos en la textura de los productos alimentarios.

Palabras clave: lípidos, oleogeles, biopolímeros.

ABSTRACT

Lipids, especially saturated fats, are a fundamental ingredient in food products, as they may develop desirable sensory characteristics (texture and palatability). However, the excessive consumption of saturated fats has been related to the development of cardiovascular diseases. Therefore, the food industry has a great interest in reducing the saturated fat content in food products. A novel alternative is the utilization of gelled oils (oleogels) using biopolymers. Biopolymer-based oleogels have been used in different food products (bakery, chocolates, and meat), nevertheless, it is important to determine the impact of these systems in the physical characteristics of food products because they determine in a great extent their acceptability. The aim of this review is to explore the methods to obtain oleogels using biopolymers, as well as its characteristics, applications, and the effects in food products texture.

Keywords: lipids, oleogels, biopolymers.

INTRODUCCIÓN

Los polímeros son moléculas complejas que se componen de unidades repetitivas de monómeros unidos por enlaces covalentes. Los polímeros de base biológica, también conocidos como biopolímeros, a diferencia de los derivados de petrolatos (sintéticos), se producen a partir de organismos vivos (Brigham, 2018). El uso de este tipo de moléculas se ha preferido debido a que son degradables y provienen de fuentes renovables.

Dentro de los biopolímeros más empleados en diferentes sectores industriales, se encuentran los polisacáridos provenientes de plantas, entre ellos se encuentran el almidón y fibras solubles (gomas). Dado que contienen un gran número de grupos hidroxilo en su estructura, estos biopolímeros tienen gran afinidad por medios acuosos, aumentando su solubilidad (Ozilgen y Bucak, 2018; Peng y Yao, 2017; Saha y Bhattacharya, 2010). Las moléculas proteicas son biopolímeros que, gracias a sus características anfipáticas (poseen grupos hidrofóbicos e hidrofílicos) han sido utilizadas –además de

como agentes gelificantes en alimentos como el tofu–, como estabilizantes de espumas y emulsiones alimentarias en yogures, helados, productos cárnicos procesados, entre otros (Jiménez-Colmenero *et al.*, 2001).

A últimas fechas, el interés por reemplazar los lípidos saturados y/o lípidos parcialmente hidrogenados (fuente de ácidos grasos *trans*) por lípidos más saludables (lípidos insaturados) en alimentos procesados se ha incrementado. Los consumidores son cada vez más conscientes acerca de los efectos negativos que la ingesta de lípidos saturados y *trans* ocasiona en la salud (Martins *et al.*, 2018; Patel y Dewettinck, 2016; Puşçaş *et al.*, 2020). La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha recomendado sustituir los lípidos saturados por lípidos insaturados, debido a que ello trae consigo beneficios a la salud, como la promoción del desarrollo cognitivo, una mayor cardioprotección y beneficios antiinflamatorios (Husted y Bouzinova, 2016; Orsavova *et al.*, 2015; Puşçaş *et al.*, 2020; Vieira *et al.*, 2015). En la figura 1 se muestra una representación general de los ácidos grasos saturados, *trans*, monoinsaturados y poliinsaturados.

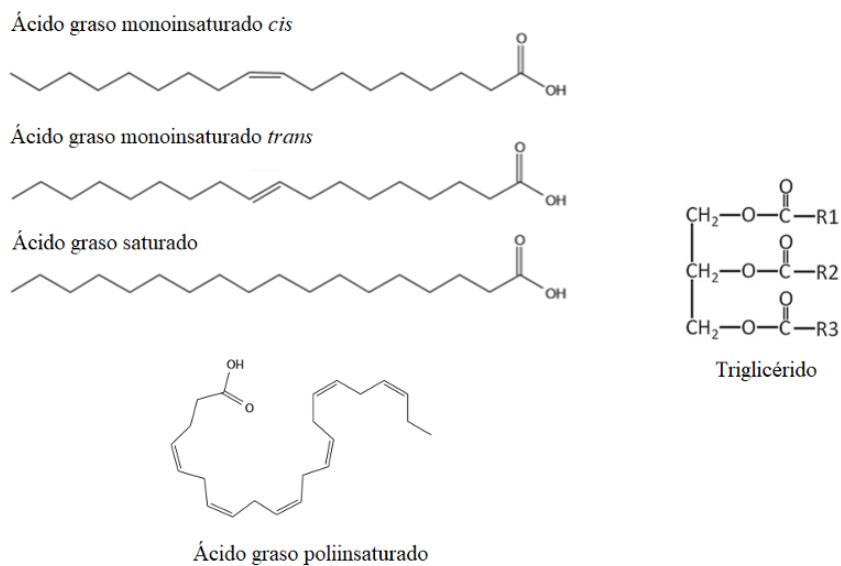


Figura 1.

Representación esquemática de ácidos grasos saturados, monoinsaturados, poliinsaturados, ácidos grasos *trans* y triglicéridos (R₁, R₂ y R₃ representan los ácidos grasos 1, 2 y 3, respectivamente). Adaptada de Winkler-Moser y Mehta (2015), y Shahidi y Ambigaipalan (2018).

Especialistas en el área de la industria alimentaria han puesto en marcha estrategias para reemplazar lípidos saturados con productos que imiten las características sensoriales y físicas de los productos convencionales (Puşaş *et al.*, 2020; Vieira *et al.*, 2015). Como parte de estos esfuerzos, se ha buscado controlar el comportamiento físico de aceites vegetales líquidos (fuente de lípidos insaturados), mediante el uso de técnicas como la oleogelación, para que puedan ser utilizados como lípidos sólidos. Los oleogeles son aceites estructurados por moléculas anfifílicas que presentan interacciones de tipo no covalente entre ellas, formando una red tridimensional, que atrapa a un líquido oleoso por fuerzas de capilaridad (Singh *et al.*, 2017). Estos sistemas tienen la característica de ser aceites sólidos a temperatura ambiente gracias a la presencia de un agente gelificante que permite la formación y estabilización de una estructura tridimensional (Martins *et al.*, 2018; Patel y Dewettinck, 2016).

El objetivo de la siguiente revisión bibliográfica es explorar los métodos para desarrollar oleogeles utilizando biopolímeros, así como sus características, aplicaciones, y efectos en la textura de los productos alimentarios.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. Técnicas de oleogelación usando biopolímeros

Los métodos de oleogelación pueden clasificarse en directos e indirectos con base en el tipo de agente gelificante y su forma de solubilización. En la tabla I se muestra un resumen de oleogeles elaborados con biopolímeros, el método empleado, el agente gelificante y sus características. A continuación, se describirán los métodos utilizados (directos e indirectos) para obtener oleogeles utilizando biopolímeros como polisacáridos y proteínas.

Tabla I. Oleogeles elaborados con biopolímeros: métodos, materiales y características

| Tipo de método | Agente gelificante | Características del oleogel | Referencia |
|----------------|--|--|---|
| Directo | EC 10cP, EC 20cP, EC 50cP, EC 100cP y EC 200cP 4 - 6 % | La firmeza de los oleogeles se ve favorecida al utilizar EC 100cP. El enfriamiento paulatino en un rango de 80 - 100 °C produce oleogeles más firmes por la formación de redes biopoliméricas ordenadas. | Davidovich-Pinhas, Gravelle <i>et al.</i> (2015); Ye <i>et al.</i> (2019) |
| Hidrogel | k-carragenina 0.4 %, 1 %, 2 %. | El aumento de la concentración del biopolímero aumenta la resistencia estructural, la capacidad de sorción de aceite. El aumento de concentración de k-carragenina disminuyó la retención de aceite en el oleogel. | Manzocco <i>et al.</i> (2017) |
| Emulsión | HPMC 0.1 - 1 % | El aumento de la concentración de biopolímero aumenta la firmeza y módulo de almacenamiento. No demuestran comportamiento termorreversible. | Bascuas <i>et al.</i> (2020) Meng <i>et al.</i> (2018) |
| Espuma | HPMC 4000 cP 2 % | Características similares a los oleogeles obtenidos con HPMC con modelo de emulsión. No demuestran recuperación estructural. | Patel <i>et al.</i> (2013) |
| Emulsión | MC 4, MC 50, MC 400, MC1500, MC 4000 2 % | La MC 4 y 50 no logran estructurar el aceite. La MC 4000 produce un gel no manipulable. MC 400 y 1500 son aptos para la obtención de oleogeles. | Patel, Lewille <i>et al.</i> (2014) |

Tabla I. Oleogeles elaborados con biopolímeros: métodos, materiales y características (continuación)

| Tipo de método | Agente gelificante | Características del oleogel | Referencia |
|-----------------------|---|--|--|
| Emulsión | Proteína de soya 0.6, 0.8, 1 y 1.2 % y alginato de sodio 0.1 % | La retención de aceite incrementa proporcionalmente a la concentración de proteína (mayor a 95 %). Módulo de almacenamiento similar a oleogeles de gelatina y aislado de suero de leche. | Wijaya <i>et al.</i> (2019). |
| Espuma | Proteína de soya y alginato de sodio (concentraciones no especificadas) | Disminución en la capacidad de retención de aceite (30 %) comparado con oleogeles de proteína de soya-alginato de sodio elaboradas con emulsiones. | Chen y Zhang (2020). |
| Emulsión | Caseinato de sodio | El uso de caseinato de sodio, goma xantana y goma guar en proporciones de 4 %, 0.5 % y 1 % produce oleogeles con mayor estabilidad. | Meissner <i>et al.</i> (2019) |
| Emulsión | Gelatina (1.2 %), goma de linaza (0.6 %) y ácido tánico (0.075 %) | Recuperación estructural de 60 - 80 % y comportamiento termorreversible. | Qiu <i>et al.</i> (2018) |
| Espuma | Gelatina (1.6 %) y goma xantana (0.6 %) | Recuperación estructural del 60 % y comportamiento termorreversible. | Patel, Cludts <i>et al.</i> (2014) |
| Hidrogel | Aislado de suero de leche (20 %) | Módulo de almacenamiento de hasta 1000 kPa. | De Vries <i>et al.</i> (2020) |
| Agregados de proteína | Aislado de suero de leche 4 % | Las propiedades reológicas (G') de los oleogeles con 4 % de proteínas pueden ser mejoradas (de 1000 Pa a 100,000 Pa) al agregar 0.2 - 0.3 g de agua por g de proteína. | De Vries <i>et al.</i> (2018) Meissner <i>et al.</i> (2019) |

1.1. Métodos directos

En los métodos directos, la solubilización del agente gelificante se disuelve directamente en la fase oleosa. Existen distintos compuestos que se pueden utilizar por dispersión directa, como la lecitina, los monoglicéridos, las ceras y fitoesteroles, los cuales pueden dispersarse y reestructurar los lípidos mediante procesos de cristalización (Martins *et al.*, 2019). Por otro lado, en el caso de los biopolímeros, la etilcelulosa (EC) es el único biopolímero que se ha empleado por métodos directos para la elaboración de oleogeles (Patel y Dewettinck, 2016).

La EC es un polisacárido derivado de la celulosa; está formado por unidades de D-glucosa unidas por enlaces β -1,4. Este biopolímero se modifica parcialmente (48-49.5 %) para aumentar su hidrofobicidad; la cual consiste en el reemplazo de las subunidades hidrofílicas (OH^-) de las moléculas de glucosa por grupos etilo (grupos hidrofóbicos) (Gravelle *et al.*, 2013). De manera breve, el método consiste en añadir la EC al aceite y calentarlo por encima de la temperatura de transición vítrea del polisacárido (140-150 °C) durante 45 minutos, posteriormente,

la mezcla debe enfriarse paulatinamente hasta los 4 °C para inducir la asociación de cadenas biopoliméricas y, por lo tanto, la gelificación (Gravelle *et al.*, 2013; Munk *et al.*, 2018; Zetl *et al.*, 2012). De acuerdo con sus características microestructurales, estos oleogeles se estabilizan mediante puentes de hidrógeno establecidos entre moléculas de EC, formando estructuras multicapas en las cuales se retiene el aceite (Davidovich-Pinhas, Barbut *et al.*, 2015; Laredo *et al.*, 2011).

Existen diferentes factores que afectan las características físicas de los oleogeles obtenidos con EC, por ejemplo, el peso molecular del biopolímero, la concentración del biopolímero y la velocidad de enfriamiento. La EC se puede obtener con diferentes pesos moleculares, identificados por su viscosidad en cP, como EC7 cP, EC20 cP, EC50 cP, EC100 cP y EC200 cP. Se ha demostrado que el uso de EC100 cP genera oleogeles con mayor firmeza y viscosidad aparente, y una menor migración (pérdida) de aceite; esto se atribuye principalmente a que un mayor tamaño de la cadena biopolimérica, favorece un mayor número de enlaces y una red tridimensional más fuerte. En este sentido, los oleogeles

obtenidos con EC100 cP son más firmes (175.94 g) comparados con los resultantes de EC7 cP, EC20 cP o 50 cP (13.5 g-130 g). Al igual que la firmeza, la viscosidad aparente aumenta al utilizar la EC100 cP comparada con una EC de menor tamaño molecular. Por el contrario, la migración de aceite disminuye de un 7.5 % hasta un 3 % al usar EC100 cP (Ye *et al.*, 2019).

Al igual que el tamaño molecular del biopolímero, la temperatura de enfriamiento de los oleogeles elaborados con EC también afecta la firmeza de los sistemas finales, esto se debe a que, al disminuir drásticamente la temperatura, la formación de los puentes de hidrógeno entre las moléculas de EC se vuelve aleatoria, dando lugar a una red menos resistente. Un estudio mostró que, cuando el periodo de gelificación de la EC (posterior a la dispersión) se mantiene en un rango de 80-100 °C, la firmeza de los oleogeles es de aproximadamente 120 N, mientras que, al disminuir la temperatura de gelificación a 50 °C, 20 °C y 4 °C, la firmeza disminuye a 60 N, 30 N y 70 N, respectivamente (Davidovich-Pinhas, Gravelle *et al.*, 2015).

Los aceites vegetales son apreciados por su contenido en ácidos grasos monoinsaturados, ácidos grasos poliinsaturados y de compuestos bioactivos como carotenoides y tocoferoles, sin embargo, los ácidos grasos poliinsaturados son inestables a altas temperaturas (llegando incluso a perder sus insaturaciones), mientras que los carotenoides y tocoferoles –precursor de vitaminas y antioxidantes– son termosensibles. Por lo tanto, el uso de las altas temperaturas en el proceso de la elaboración de oleogeles con EC, podría afectar la calidad nutrimental del aceite, especialmente aquellos ricos en ácidos grasos poliinsaturados (aceite de girasol, soya y maíz), además podría disminuir la bioaccesibilidad de los compuestos bioactivos del aceite (Ghosh *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2019; Zambiasi *et al.*, 2007).

1.2. Métodos indirectos

Los métodos indirectos implican la formación previa de un sistema más complejo mediante el uso de biopolímeros, como emulsiones y espumas, los cuales se disuelven en la fase acuosa. Estos sistemas sirven como base estructural en la formación del oleogel (Martins *et al.*, 2018).

Los métodos indirectos utilizan, en general, dos procedimientos: la emulsión y la espuma. Cuando el sistema estructural se compone de un aceite en agua, se le conoce como «método con base en emulsiones». En estos casos, es importante que la concentración de aceite se mantenga relativamente alta (>60 %)

utilizando altas velocidades de homogeneización (>6000 rpm). Este sistema se somete a un proceso de deshidratación, ya sea mediante secado por convección, vacío o liofilización, dando como resultado un oleogel rico en lípidos (>96 % de aceite), en donde los biopolímeros forman la parte restante actuando como agentes estabilizantes (Martins *et al.*, 2018; Patel y Dewettinck, 2016). Por otro lado, encontramos el «método con base en espumas», cuya metodología de preparación consiste en la formación del sistema espumante mediante un homogeneizador de rotor, por ejemplo, Ultraturrax, a altas velocidades (>6000 rpm). Una vez que la fase acuosa se deshidrata, el sistema se somete a inmersión en el aceite para obtener el oleogel (Martins *et al.*, 2018; Patel y Dewettinck, 2016). Una de las desventajas del uso de modelos de espuma es que la exposición al oxígeno durante el proceso de inmersión podría producir rancidez en el aceite.

1.2.1. Oleogeles utilizando polisacáridos

La hidroxipropil metilcelulosa (HPMC) es un derivado de la celulosa que posee grupos funcionales hidrofóbicos (CH_3) e hidrofilicos ($\text{OH}-$), y ha sido empleada para la elaboración de oleogeles utilizando emulsiones (Bascuas *et al.*, 2020; Meng *et al.*, 2018a, 2018b) y espumas (Patel *et al.*, 2013) como base.

Al utilizar sistemas de emulsiones aceite/agua con una concentración de más del 60 % de aceite como base para obtener oleogeles, la combinación de HPMC con goma xantana (GX) mejora las propiedades de los oleogeles, principalmente porque las gomas (como GX) actúan como estabilizante y previenen la coalescencia de la emulsión durante el secado. En cuanto a las propiedades de los oleogeles elaborados con HPMC, se ha observado un comportamiento sólido ($G' > G''$). El módulo de almacenamiento (G') demostró valores en un rango de 6.88-9.88 $\times 10^4$ MPa y se ha reportado una recuperación estructural del 50-70 %. La firmeza de los oleogeles se puede encontrar en un rango de 230.1 g-578.2 g (Bascuas *et al.*, 2020; Meng *et al.*, 2018a, 2018b). A diferencia de lo observado en otros estudios, estos oleogeles no demostraron un comportamiento termo-reversible, lo cual podría limitar su uso para alimentos que requieren procesos con altas temperaturas.

Se ha utilizado la HPMC4000 cP en la elaboración de oleogeles con espumas como base. Las espumas obtenidas, después de ser deshidratadas, se usan como estructura física para la adsorción de aceite. Estos oleogeles presentan las características reológicas de un gel ($G' > G''$), con módulos de almacenamiento

to de hasta 10,000 Pa. Es importante notar que estos oleogeles no demuestran recuperación estructural posterior a la aplicación de una fuerza de corte (Patel *et al.*, 2013). Por lo tanto, resultaría más conveniente utilizar emulsiones como base para oleogeles con HPMC, ya que estos sí son capaces de reordenar su estructura después del proceso de homogeneización.

La metilcelulosa (MC) también es un derivado de la celulosa al que se le añaden grupos metilo (CH_3). Este polisacárido, en combinación con GX, ha sido utilizado para elaborar oleogeles mediante el modelo de emulsiones y un secado convencional a 50 °C. De manera similar a la EC, la MC puede tener diversos pesos moleculares (MC 15, MC 400, MC 1500 y MC 4000), lo cual afecta las propiedades de los oleogeles. La MC 400 y la MC 1500 son las más adecuadas para la producción de oleogeles; utilizando estos biopolímeros, los oleogeles no presentan liberación de aceite y pueden ser manipulados para su incorporación en sistemas alimentarios. En cuanto a su comportamiento reológico, estos oleogeles presentan un comportamiento sólido ($G' > G''$), el módulo de almacenamiento se encuentra en un rango de 275 Pa y su recuperación estructural es del 43 % (Patel, Cludts *et al.*, 2014). Los oleogeles obtenidos por medio de MC, presentan una estructura menos resistente comparada con las de los oleogeles de HPMC, como indica la diferencia drástica en el módulo de almacenamiento entre ambos sistemas. Además, la recuperación estructural es menor comparada con los oleogeles de HPMC (obtenidos con emulsiones como base).

Los hidrogeles (geles con una fase continua acuosa) también se usan para obtener una estructura física capaz de retener aceite por absorción capilar. Este método indirecto ha sido utilizado para la elaboración de oleogeles con k-carragenina. Los hidrogeles son altamente sensibles y pueden debilitarse durante los procesos de deshidratación convencionales (estufa) y liofilización, debido al encogimiento de la estructura y la formación de cristales, respectivamente (Plazzotta *et al.*, 2019). Manzocco *et al.* (2017) utilizaron un proceso de secado con CO_2 supercrítico que favorece la integridad de la estructura formada por los hidrogeles. Los hidrogeles elaborados con k-carragenina (0.4, 1 y 2 %) se sumergieron en soluciones etanólicas y fueron secados con fluidos supercríticos (CO_2) a una presión de 2-8 MPa a 45 °C. El aumento de la concentración de

k-carragenina incrementó drásticamente la retención de aceite, registrando un $15 \frac{\text{g}_{\text{aceite}}}{\text{g}_{\text{aerogel}}} / \text{cm}^3$ al utilizar 2 % de concentración del biopolímero, mientras que en la de los oleogeles con 1 % se observó únicamente un $2.5 \frac{\text{g}_{\text{aceite}}}{\text{g}_{\text{aerogel}}} / \text{cm}^3$. Sin embargo, utilizar el 2 % de k-carragenina promovió la formación de poros más grandes, lo cual resulta en una menor estabilidad (retención de aceite) comparada con la de los oleogeles de 1 % y 0.4 % del biopolímero (62.21 %, 82.18 %, 83 %, respectivamente). La firmeza de los oleogeles deshidratados con CO_2 supercrítico es mayor (158.33-311.70 N) comparada con la de los oleogeles deshidratados mediante liofilización (1.7 N-61.24 N) (Manzocco *et al.*, 2017; Plazzotta *et al.*, 2019). Vemos entonces que, aunque el secado por medio de fluidos supercríticos otorga beneficios en la estabilidad de los oleogeles comparado con la liofilización, el costo elevado de este proceso (secado por fluidos supercríticos) puede representar una desventaja para su uso a gran escala.

1.2.2. Oleogeles utilizando proteínas

Para la elaboración de oleogeles, se han utilizado proteínas de diversas formas; entre los métodos más explorados están las emulsiones y, en menor medida, las espumas y agregados proteicos.

En cuanto al uso de emulsiones, es necesario lograr una estructura estable ante la coalescencia, ya que cuando la emulsión se somete a deshidratación, la fase oleosa puede aglomerarse, desestabilizando e incluso colapsando el sistema por coalescencia. Es posible estabilizar las emulsiones utilizando proteínas, puesto que, gracias a la estructura anfipática de estos biopolímeros, actúan como agentes emulgentes al disminuir la tensión interfacial mediante la formación de capas interfaciales y el aumento de las cargas netas. También se ha reportado que la combinación de proteínas con otros biopolímeros, como los polisacáridos, puede mejorar la estabilidad de las emulsiones. Esto se debe a un aumento en la viscosidad, el volumen de la capa interfacial y las repulsiones electrostáticas entre las partículas de la emulsión (Abdolmaleki *et al.*, 2019; Chen y Zhang, 2020; De Oliveira *et al.*, 2016; Patel, Lewille *et al.*, 2014).

Las proteínas de origen animal más utilizadas en la producción de oleogeles, son los aislados de suero de leche, el caseinato de sodio y la gelatina, gracias a las características físicas y reoló-

gicas específicas que les confieren a los sistemas, ya que son elementos de grado alimentario. En un estudio realizado con mezclas binarias y ternarias de caseinato de sodio (cs), goma xantana (GX) y goma guar (GG), enfocado en la disminución de la pérdida de aceite en los oleogeles, se demostró que las combinaciones ternarias (CN/GX/GX) producen oleogeles con una alta retención de aceite (98 %). Se observó que estos oleogeles tuvieron una viscosidad aparente ($\mu_{ap} = 279.26$ Pa s-275.36 Pa s) y módulos de almacenamiento ($G' = 275.362$ Pa) similares a una margarina industrial ($\mu_{ap} = 330$ Pa s y $G' = 246.287$ Pa), pueden ser una opción viable para la elaboración de margarinas con alto contenido de ácidos grasos insaturados (Abdolmaleki *et al.*, 2019).

La gelatina es una proteína utilizada en la industria alimentaria por sus propiedades gelificantes, sin embargo, se ha implementado como ingrediente en la formulación de oleogeles a partir de emulsiones y espumas. Patel, Lewille *et al.* (2014) utilizaron emulsiones con un volumen del 60 % de aceite, deshidratadas a 70 °C o mediante liofilización. Los oleogeles obtenidos a partir de esta formulación presentan una firmeza de 0.6-1.19 N al utilizar deshidratación por liofilización y de 0.46 - 0.63 N cuando son secados por convección. De acuerdo con el comportamiento reológico, estos oleogeles tienen un comportamiento pseudoplástico con una fuerte estructura indicada por un aumento de G' (10,000 Pa) con respecto a la G'' (1000 Pa). Aunque estos oleogeles presentan una disminución de la viscosidad en función de una mayor velocidad de corte y temperatura, tienen la capacidad de una recuperación parcial de la estructura. Estas características reológicas y capacidades de recuperación estructural han sido reportadas de manera similar en formulaciones de gelatina (1.2 %), goma de linaza (0.6 %) y ácido tánico (0.075 %) (Qiu *et al.*, 2018). La microestructura de los oleogeles obtenidos a partir de emulsiones, los oleogeles están estabilizados por la formación de una monocapa interfacial, la cual se establece por medio de interacciones proteína-proteína, de esta manera, el aceite es retenido en las estructuras polihédricas (Mezzenga y Ulrich, 2010; Patel *et al.*, 2015; Romoscanu y Mezzenga, 2006; Wijaya *et al.*, 2019).

Otra alternativa reportada ha sido el uso de gelatina a partir de espumas, en este caso, la espuma deshidratada forma una estructura porosa que es capaz de absorber hasta un 51 % de

su peso en aceite. De acuerdo con su capacidad de retención de aceite (96 % de retención de aceite), se considera que estos oleogeles tienen alta estabilidad física. Entre las propiedades físicas de estos oleogeles, se reporta una estructura resistente característica de un gel, donde la G' (2.59 - 8.63 x 10⁴ MPa) es hasta 11 veces más alta comparada con G'' . Estos oleogeles también demostraron una recuperación de hasta 60 % de su estructura después de aplicar fuerzas de corte (0.1 - 10 s⁻¹). De acuerdo con estas características, estos oleogeles han sido propuestos para la elaboración de productos que requieren altas temperaturas u horneado (Abdollahi *et al.*, 2020).

Además de las propiedades emulgentes y espumantes de las proteínas de origen animal, la capacidad de formar hidrogeles también ha sido aprovechada para la formación de oleogeles a través de un método conocido como «intercambio de solvente». Este método ha sido descrito por De Vries, Hendriks, Van der Linden y Scholten (2015). Una vez obtenido el hidrogel por desnaturalización parcial térmica (85 °C por 30 minutos), se le elimina el agua al sumergirlo en un solvente intermedio (acetona). Posterior a la eliminación de agua, la estructura tridimensional formada por las proteínas se sumerge en el aceite, el cual ingresa al sistema por medio de fenómenos de difusión y es retenido por fuerzas capilares para formar el oleogel.

Este método ha sido mejorado y modificado, sustituyendo el uso de un hidrogel por un agregado de proteínas (obtenido por desnaturalización térmica), el cual es utilizado para el procedimiento de intercambio de solventes, en donde el agregado proteico actúa como agente gelificante del aceite de interés. El mecanismo de gelificación en este método se basa en las interacciones de los residuos hidrofóbicos de las proteínas con el medio oleoso, y la estabilización de una red tridimensional por puentes hidrógeno entre los residuos hidrofílicos de las proteínas. Las propiedades reológicas de estos oleogeles están determinadas por dos factores, la concentración de proteína utilizada para formar el oleogel y por la adición de agua al oleogel (adición directa durante el proceso de gelificación). Se ha reportado que el uso de concentraciones de proteína <6 % reduce drásticamente el módulo de almacenamiento (1000 Pa), comparado con oleogeles al 15 % de concentración de proteína ($G' = 1000$ kPa) (De Vries *et al.*, 2015; De Vries *et al.*, 2017). Sin

embargo, al añadir agua en una concentración de 0.3 g de agua/g de proteína, la G' puede incrementar hasta 100,000 Pa utilizando solamente 4 % de concentración de proteínas (De Vries *et al.*, 2018; Meissner *et al.*, 2019).

La proteína de soya ha sido la única proteína vegetal explorada en la elaboración de oleogeles. Wijaya *et al.* (2019) elaboraron oleogeles utilizando emulsiones estabilizadas con mezclas de proteína de soya (0.6, 0.8, 1 y 1.2 %) y alginato de sodio (0.1 %), en su trabajo, estudiaron el efecto de la concentración de proteína sobre las propiedades finales de los oleogeles. La combinación con mayor concentración de proteínas produjo los oleogeles con mayor estabilidad ($>95\%$ de retención de aceite) y mayor módulo de almacenamiento (6.8×10^4 Pa), lo cual indica una estructura más rígida y resistente. Sin embargo, la capacidad de retención de aceite puede variar de acuerdo con el método de elaboración del oleogel. Al utilizar espumas con proteína de soya, los oleogeles

obtenidos fueron menos estables comparado con los oleogeles a partir de emulsiones, ya que la retención de aceite fue de únicamente 40 % (Chen y Zhang, 2020).

2. Aplicación de oleogeles en alimentos

Los oleogeles se han empleado para la elaboración de diferentes tipos de alimentos, por ejemplo, en productos cárnicos, los cuales han sido los más estudiados. Además, se han utilizado para la producción de panes, queso crema, rellenos para galletas, helados y chocolates. En cuanto a la naturaleza de los oleogeles, los más empleados en sistemas alimentarios han sido los elaborados con EC, y en menor medida, aquellos elaborados con otros derivados de celulosa (HPMC Y MC) o proteínas. A continuación (tabla II), se presentan los usos de oleogeles en los sistemas alimentarios mencionados anteriormente, así como también se explorará el efecto de dichos oleogeles sobre las características físicas u organolépticas de los productos alimentarios.

Tabla II. Oleogeles utilizados en productos alimentarios, nivel de sustitución y efecto en el producto alimentario

| Producto alimentario | Lípido saturado reemplazado | Biopolímero y concentración (%) | Lípido insaturado contenido en el oleogel | Efecto en las propiedades sensoriales o físicas del producto | Referencia |
|---------------------------|-----------------------------|---|---|--|---|
| Helado | Aceite de coco | 10 % EC | Aceite de girasol | Aumento en el tamaño de glóbulos de grasa. Derretimiento más lento al sustituir el aceite de coco. | Munk <i>et al.</i> (2018) |
| Salchichas tipo Frankfurt | Grasa de cerdo | 10 % EC + 1.5 de moestearato de sorbitano | Aceite de canola | Dureza similar la salchicha Frankfurt tradicional con una sustitución del 80 % de grasa de cerdo. | Zetzl <i>et al.</i> (2012) Barbut <i>et al.</i> (2016ab) |
| Venison español | Grasa de cerdo | 1 % de proteína de soya | Aceite de oliva | Disminución de la aceptabilidad general al sustituir más del 25 %, aumento del sabor y olor característico del aceite de oliva | Utrilla <i>et al.</i> (2014) |
| Paté | Grasa de cerdo | 11 % EC + 3.67 % moestearato de sorbitano | Mezcla de aceite de oliva-linaza-pescado (44.39 %–37.87 %–17.74 %, respectivamente) | Textura similar a las muestras control y disminución de la aceptabilidad general fue menor al sustituir la grasa de cerdo | Gómez-Estaca <i>et al.</i> (2018) |
| Hamburguesa | Grasa de res | 4 % HPMC | Aceite de canola | Reducción en la firmeza entre 60 y 70 %. Disminución de aceptabilidad general a partir de un 50 % de sustitución de grasa | Oh <i>et al.</i> (2019) |
| Margarinas | Proceso de hidrogenación | 10 % EC + 1 % TMS | Aceite de soya | Propiedades de hidroscopicidad, incorporación de aire y propiedades reológicas similares a margarinas comerciales. | Patel, Cludts <i>et al.</i> (2014) Ye <i>et al.</i> (2019) |

Tabla II. Oleogeles utilizados en productos alimentarios, nivel de sustitución y efecto en el producto alimentario (continuación)

| Producto alimentario | Lípido saturado reemplazado | Biopolímero y concentración (%) | Lípido insaturado contenido en el oleogel | Efecto en las propiedades sensoriales o físicas del producto | Referencia |
|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|---|--|---|
| Panes | Manteca vegetal | 10 % EC | Aceite de soya | Perfil de textura similar a los panes elaborados con manteca vegetal comercial | Patel, Cludts <i>et al.</i> (2014) Ye <i>et al.</i> (2019) |
| Muffins | Manteca vegetal | 4 % HPMC | Aceite de girasol | Aumento de la dureza y fracturabilidad al sustituir más del 50 % de manteca vegetal. | Oh y Lee (2018) |
| Relleno cremoso de galletas | Manteca vegetal | 3 % HPMC 3 % MC | Aceite de canola | Ligera disminución de la liberación de aceite y aumento de la dureza al sustituir más del 75 % de manteca vegetal. | Tanti <i>et al.</i> (2016) |
| Chocolate | N.E. | 2.17 % EC | N.E. | Producción de chocolates firmes a temperaturas > 40 °C. | Stortz y Marangoni (2013) |
| Queso crema | Crema de leche | 10 % EC | Aceite de soya | Disminución de la adhesividad y aceptabilidad sensorial al sustituir la crema. | Bemer <i>et al.</i> (2016) |

*N.E: No especificado. EC: Etilcelulosa. HPMC: Hidroxipropilmetylcelulosa. MC: Metilcelulosa. TMS: trigliceril monoestearato.

2.1. Productos cárnicos

Los oleogeles basados en biopolímeros han sido utilizados mayormente en productos cárnicos, actualmente, existen reportes de su uso en salchichas tipo Frankfurt, embutidos, paté y hamburguesas de carne de res. En alimentos como el paté, la grasa animal es fundamental para el desarrollo de la textura y untabilidad, y la adición de aceite puede incrementar la dureza del producto, además de generar sabores y olores desagradables por la oxidación de lípidos. El uso de oleogeles en estos productos puede ser una alternativa para la producción de paté con una textura similar. La sustitución total de grasa de cerdo (15 %) con oleogeles de EC (11 % + 3.67 % monoestearato de sorbitano) en muestras de paté, incrementó en gran medida la cantidad de ácidos grasos insaturados (10.62 mg/g) comparado con las muestras control (8.09 mg/g). La adición de oleogeles de EC modificó ligeramente la fuerza de penetración en las muestras de paté (1.22 - 1.28 N) comparado con los productos control (0.94 N). Sin

embargo, las propiedades sensoriales sí fueron afectadas negativamente, ya que la aceptabilidad general fue menor en los productos con oleogeles (5.3 - 6) comparado con las de las muestras con grasa de cerdo (7.5) (Gómez-Estaca *et al.*, 2018).

Los oleogeles de EC también han sido utilizados en la elaboración de salchichas tipo Frankfurt, de manera similar a los patés reducidos en grasa animal, las salchichas elaboradas con oleogeles demostraron propiedades de textura similares a los productos con grasa de cerdo. Zetzl *et al.* (2012), estudiaron el efecto de la sustitución de grasa animal con oleogeles de EC10 cP. La adición de estos oleogeles en la formulación de salchichas no modificó la dureza de los productos con respecto a las salchichas convencionales (42 N y 39 N, respectivamente), así mismo, no se observaron diferencias entre la masticabilidad de las muestras reducidas en lípidos saturados (10 N) y las muestras control (9 N). Por el contrario, el uso de aceite líquido aumentó considerablemente ambas propiedades de textura, esto se atribuye

a un aumento de las interacciones entre las proteínas de la carne, formando una masa con mayor densidad y compactación. De acuerdo con sus propiedades sensoriales, se ha demostrado que se puede sustituir hasta un 80 % de grasa de cerdo con oleogeles de EC10 cP (8 - 10 %) y 1.5 % de monoestearato de sorbitano sin afectar la aceptabilidad de las salchichas tipo Frankfurt (Barbut *et al.*, 2016a, 2016b).

Debido a los cambios en textura y propiedades sensoriales, los oleogeles elaborados con HPMC se pueden utilizar para una sustitución parcial de grasa animal. Al utilizar oleogeles de HPMC para sustituir la grasa de res en hamburguesas, se observó una reducción en la firmeza en un rango de 60-70 % comparado con las muestras control. De acuerdo con la evaluación sensorial, se puede reemplazar hasta un 50 % de grasa de res con oleogeles de HPMC sin afectar el sabor y la aceptabilidad general de las hamburguesas (Oh *et al.*, 2019).

La información de oleogeles elaborados con proteínas y su efecto sobre matrices alimentarias es limitada. Se ha evaluado el efecto del reemplazo parcial (0, 15, 25, 35, 45 y 55 %) de grasa de cerdo por oleogeles elaborados con proteína de soya en muestras de Venison español. Con respecto a la aceptabilidad de los productos, la sustitución de grasa de cerdo en una proporción mayor al 25 % afecta negativamente los atributos de aceptabilidad, sabor, olor y color, principalmente por una predominancia del aroma y sabor característicos del aceite de oliva (Utrilla *et al.*, 2014). El uso de aceites con menor cantidad de compuestos aromáticos podría permitir una mayor sustitución de grasa de cerdo sin comprometer las propiedades de sabor y aroma de los productos adicionados con oleogeles.

2.2. Productos de panadería

La margarina y las mantecas vegetales son ingredientes fundamentales para la elaboración de panes, ya que tienen la función de incorporar aire, volumen y controlar las interacciones de proteínas (gluten) en la masa (Zhu *et al.*, 2005). De acuerdo con las características de firmeza que pueden ser obtenidas con los oleogeles de EC100 cP han sido aprovechadas para la elaboración de margarinas con alto contenido de ácidos grasos insaturados, así como la ausencia de ácidos grasos *trans* (Ye *et al.*, 2019), de igual manera, también se han empleado oleogeles de MC como sustitutos de margarina (Patel, Cludts *et al.*, 2014). La higroscopidad entre la margarina elaborada con oleogeles (51 mL/20 g de aceite) no difiere de algunas margarinas comerciales (48 mL/20 g de aceite). Al igual que la higroscopidad, la capacidad de incorporación de aire es fun-

damental en las margarinas, ya que ayudan a la formación de alveolos y generar volumen en panes; esta propiedad ha sido estudiada en margarinas elaboradas con EC100 cP, y aunque ha sido menor comparada con margarinas comerciales (0.08 g/mL y 0.13 g/mL respectivamente), la adición de emulgentes como el trigliceril monoestearato (TMS) en concentraciones del 1 % puede aumentar la incorporación de aire de 0.08 hasta 0.14 g/mL de las margarinas con oleogeles. Estas margarinas (EC100 cP y 1 % de TMS) son ideales para la elaboración de panes, ya que el uso de esta margarina aumenta el volumen específico de los panes comparado con la margarina comercial (6.27 mL/g y 5.98 mL/g, respectivamente) generando panes más suaves (Ye *et al.*, 2019). Otro producto similar ha sido elaborado por Patel, Cludts *et al.* (2014), en su estudio se utilizaron oleogeles de MC 1500 (0.8 % + 0.6 % GX) para la elaboración de panes reducidos en margarina o manteca vegetal. Los oleogeles demostraron una incorporación de aire e higroscopidad similares a la margarina y manteca vegetal (control). A pesar de que los oleogeles empleados diferían en las características reológicas de la manteca vegetal, no hubo diferencia en las propiedades de textura (dureza, cohesividad, masticabilidad y adhesividad) entre ambas muestras de panes.

El uso de oleogeles con HPMC es más limitado comparado con otros derivados de la celulosa como EC y HPMC. Al sustituir la manteca vegetal en muffins de manera parcial (0, 25, 50, 75 y 100 %) con oleogeles de HPMC 4000 cP (4%), se ha observado que se provoca la formación de poros más grandes (3300 µm) y poco uniformes comparada con los muffins control (2060 µm). Esta diferencia en el diámetro de poros afecta en gran medida la textura de los muffins; únicamente la sustitución del 50 % de manteca vegetal con oleogeles demostró valores similares de dureza (12.03 N), cohesividad (0.63) y masticabilidad (5.59) comparado con los muffins convencionales (Oh y Lee, 2018). Debido al proceso de horneado, el uso de oleogeles capaces de recuperar su estructura (oleogeles elaborados con EC, proteínas o MC) son una opción más adecuada para la producción de productos de panadería.

2.3. Otros productos alimentarios

Los oleogeles también se han utilizado para la reducción de lípidos saturados en otro tipo de alimentos, por ejemplo, alimentos cremosos (queso crema, relleno de galletas y helados) y chocolates.

La sustitución de lípidos saturados en quesos crema por oleogeles de EC al 10 % logra mantener algunas características respecto a las de los quesos crema convencionales, tales como

el tamaño de glóbulos de grasa (9 y 9.5 μm , respectivamente), la dureza (0.7 - 0.8 N) y esparcibilidad (2.5 - 2.7 Ns), sin embargo, la adhesividad disminuye en los productos con oleogeles (0.5 Ns) con respecto a los productos control (1.4 Ns) (Bemer *et al.*, 2016). Estos cambios en la adhesividad también se han observado en rellenos cremosos para galletas, en los que se han utilizado oleogeles de HPMC y MC (a una concentración de 3 %) para sustituir la manteca vegetal en un rango del 50 - 100 %. Los oleogeles de HPMC demuestran ser los más efectivos para la producción de los rellenos, aunque disminuye la adhesividad respecto a las muestras con manteca vegetal (1.38 J y 5.89 J, respectivamente), así como también en la dureza (0.76-0.93 N y 1.49 N, respectivamente). Se observa una ligera reducción en la liberación de aceite (3 - 4 %) con respecto a las cremas convencionales (4 - 5 %) (Tanti *et al.*, 2016). De acuerdo con los cambios en la adhesividad de estos productos, es probable que el uso de un surfactante como TMS, monoestearato de sorbitano o incluso lecitina mejore la calidad de los oleogeles elaborados con EC, ya que la adición de estos compuestos (surfactantes) ha ayudado a imitar las propiedades físicas de los oleogeles comparadas con las de las margarinas.

En la aplicación de oleogeles de EC (10 %) para sustituir aceite de coco en helados, se ha observado que la adición de los oleogeles mantienen las características de estabilidad física (ante la coalescencia) del producto al crear una distribución uniforme de los glóbulos de grasa. A pesar de que el tamaño de los glóbulos de grasa se ha observado mayor en los helados con oleogeles (30 μm) respecto a los helados con aceite de coco (4 μm), la EC logra imitar la morfología y distribución de los glóbulos de grasa de las muestras control, evitando la desestabilización por coalescencia. Además, la velocidad de derretimiento resulta similar entre los productos adicionados con oleogeles y los helados convencionales (Munk *et al.*, 2018).

En chocolates, el uso de oleogeles se ha enfocado al aumento de la temperatura de derretimiento, con el fin de disminuir las pérdidas durante el transporte y almacenamiento de los chocolates en regiones cálidas. Stortz y Marangoni (2013) elaboraron chocolates añadiendo una solución de etanol con EC (concentración final del 2.17 %) al chocolate fundido. De esta manera, el oleogel se estructuró dentro de la mezcla del chocolate y posteriormente el etanol fue evaporado a 30 °C. En este estudio se obtuvieron chocolates con una firmeza mayor comparada con los chocolates comunes (18 N y 0 N, respectivamente) a una temperatura de 40 °C. Además del incremento de la firmeza a 40 °C, la liberación de aceite en los chocolates disminuyó de un 13.5 %

en el control hasta 4.5 % en los chocolates con oleogeles. Estos cambios en la firmeza se atribuyen principalmente a una mayor retención de agua al agregar EC, lo cual a su vez, podría hidratar el azúcar de la formulación y aumentar la viscosidad del sistema, incrementando así la resistencia a la deformación. La adición de oleogeles en chocolates, además de ayudar en la reducción de pérdidas en zonas tropicales, podría tener un amplio campo de aplicación en el desarrollo de postres listos para comer o para la elaboración de chocolates rellenos.

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

La posibilidad de obtener sistemas oleosos sólidos con el uso de agentes gelificantes biopoliméricos, tales como polisacáridos y proteínas, permite explorar no sólo nuevas fuentes para su obtención, sino también nuevas aplicaciones. Los biopolímeros son una alternativa atractiva para la elaboración de oleogeles que permiten la sustitución de lípidos saturados en alimentos en los cuales el contenido de estos lípidos es considerablemente alto, como son productos cárnicos procesados (embutidos, salchichas, patés etc), panadería, emulsiones (mayonesas, aderezos, cremas) y confitería (chocolate). Estudiar la formación de este tipo de sistemas usando biopolímeros de fuentes naturales endémicas o incluso a partir de residuos orgánicos puede representar un valor agregado y una gran oportunidad de investigación en el campo de los oleogeles. A pesar de que es posible utilizar los oleogeles en varios alimentos, su uso modifica los atributos de textura y sensoriales, por lo tanto, es importante profundizar en el estudio de los parámetros de procesamiento (tipo de biopolímero, concentración de biopolímero, mayor número de combinaciones de biopolímeros, temperaturas de proceso, etc.) manipulables para dirigir la producción de oleogeles hacia la producción de alimentos específicos con características sensoriales deseadas.

AGRADECIMIENTOS

El autor J. C. Metri-Ojeda 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 para sus estudios de doctorado.

REFERENCIAS

- Abdollahi, M., Goli, S. A. H. y Soltanizadeh, N. (2020). Physicochemical properties of foam-templated oleogel based on gelatin and xanthan gum. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 122(2), 1900196.
- Abdolmaleki, K., Alizadeh, L., Nayebzadeh, K., Hosseini, S. M. y Shahin, R. (2019). Oleogel production based on binary and ternary mixtures of sodium caseinate, xanthan gum, and guar gum: Optimization of hydrocolloids concentration and drying method. *Journal of Texture Studies*, 51(2), 290-299.
- Barbut, S., Wood, J. y Marangoni, A. (2016a). Potential use of organogels to replace animal fat in comminuted meat products. *Meat Science*, 122, 155-162.
- Barbut, S., Wood, J. y Marangoni, A. G. (2016b). Effects of organogel hardness and formulation on acceptance of frankfurters. *Journal of Food Science*, 81(9), C2183-C2188.
- Bascuas, S., Hernando, I., Moraga, G. y Quiles, A. (2020). Structure and stability of edible oleogels prepared with different unsaturated oils and hydrocolloids. *International Journal of Food Science & Technology*, 55(4), 1458-1467.
- Bemer, H. L., Limbaugh, M., Cramer, E. D., Harper, W. J. y Maleky, F. (2016). Vegetable organogels incorporation in cream cheese products. *Food Research International*, 85, 67-75.
- Brigham, C. (2018). Biopolymers: biodegradable alternatives to traditional plastics. En B. Török, y T. Dransfield (ed.), *Green Chemistry. An Inclusive Approach* (pp. 753-770). Elsevier.
- Chen, K. y Zhang, H. (2020). Fabrication of oleogels via a facile method by oil absorption in the aerogel templates of protein-polysaccharide conjugates. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(6), 7795-7804.
- Davidovich-Pinhas, M., Barbut, S. y Marangoni, A. G. (2015). The gelation of oil using ethyl cellulose. *Carbohydrate Polymers*, 117, 869-878.
- Davidovich-Pinhas, M., Gravelle, A. J., Barbut, S. y Marangoni, A. G. (2015). Temperature effects on the gelation of ethylcellulose oleogels. *Food Hydrocolloids*, 46, 76-83.
- De Oliveira, F. C., Coimbra, J. S. D. R., De Oliveira, E. B., Zuñiga, A. D. G. y Rojas, E. E. G. (2016). Food protein-polysaccharide conjugates obtained via the Maillard reaction: a review. *Critical Reviews in food Science and Nutrition*, 56(7), 1108-1125.
- De Vries, A., Gomez, Y. L., Van Der Linden, E. y Scholten, E. (2017). The effect of oil type on network formation by protein aggregates into oleogels. *RSC Advances*, 7(19), 11803-11812.
- De Vries, A., Hendriks, J., Van Der Linden, E. y Scholten, E. (2015). Protein oleogels from protein hydrogels via a stepwise solvent exchange route. *Langmuir*, 31(51), 13850-13859.
- De Vries, A., Jansen, D., Van Der Linden, E. y Scholten, E. (2018). Tuning the rheological properties of protein-based oleogels by water addition and heat treatment. *Food Hydrocolloids*, 79, 100-109.
- Ghosh, M., Upadhyay, R., Mahato, D. K. y Mishra, H. N. (2019). Thermal and oxidative stability assessment of synergistic blends of sunflower and sesame oils tailored for nutritionally stable composition of omega fatty acids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 135(4), 2389-2398.
- Gómez-Estaca, J., Herrero, A. M., Herranz, B., Álvarez, M. D., Jiménez-Colmenero, F. y Cofrades, S. (2019). Characterization of ethyl cellulose and beeswax oleogels and their suitability as fat replacers in healthier lipid pâté development. *Food Hydrocolloids*, 87, 960-969.
- Gravelle, A. J., Barbut, S. y Marangoni, A. G. (2013). Fractionation of ethylcellulose oleogels during setting. *Food & Function*, 4(1), 153-161.
- Husted, K. S. y Bouzinova, E. V. (2016). The importance of n-6/n-3 fatty acids ratio in the major depressive disorder. *Medicina*, 52(3), 139-147.
- Jiménez-Colmenero, F., Carballo, J. y Cofrades, S. (2001). Healthier meat and meat products: their role as functional foods. *Meat Science*, 59(1), 5-13.
- Laredo, T., Barbut, S. y Marangoni, A. G. (2011). Molecular interactions of polymer oleogelation. *Soft Matter*, 7(6), 2734-2743.
- Liu, X., Wang, S., Masui, E., Tamogami, S., Chen, J. y Zhang, H. (2019). Analysis of the dynamic decomposition of unsaturated fatty acids and tocopherols in commercial oils during deep frying. *Analytical Letters*, 52(12), 1991-2005.
- Manzocco, L., Valoppi, F., Calligaris, S., Andreatta, F., Spilimbergo, S. y Nicoli, M. C. (2017). Exploitation of κ-carrageenan aerogels as template for edible oleogel preparation. *Food Hydrocolloids*, 71, 68-75.
- Martins, A. J., Vicente, A. A., Cunha, R. L. y Cerqueira, M. A. (2018). Edible oleogels: an opportunity for fat replacement in foods. *Food & Function*, 9(2), 758-773.
- Martins, A. J., Vicente, A. A., Pastrana, L. M. y Cerqueira, M. A. (2019). Oleogels for development of health-promoting food products. *Food Science and Human Wellness*, 9(1), 31-39.
- Meissner, P. M., Keppler, J. K., Stöckmann, H., Schrader, K. y Schwarz, K. (2019). Influence of water addition on lipid oxidation in protein oleogels. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 121(9), 1800479.
- Meng, Z., Qi, K., Guo, Y., Wang, Y. y Liu, Y. (2018a). Macro-micro structure characterization and molecular properties of emulsion-templated polysaccharide oleogels. *Food Hydrocolloids*, 77, 17-29.
- Meng, Z., Qi, K., Guo, Y., Wang, Y. y Liu, Y. (2018b). Physical properties, microstructure, intermolecular forces, and oxidation stability of soybean oil oleogels structured by different cellulose ethers. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 120(6), 1700287.

- Mezzenga, R. y Ulrich, S. (2010). Spray-dried oil powder with ultrahigh oil content. *Langmuir*, 26(22), 16658-16661.
- Munk, M. B., Munk, D. M., Gustavsson, F. y Risbo, J. (2018). Using ethylcellulose to structure oil droplets in ice cream made with high oleic sunflower oil. *Journal of Food Science*, 83(10), 2520-2526.
- Oh, I. K. y Lee, S. (2018). Utilization of foam structured hydroxypropyl methylcellulose for oleogels and their application as a solid fat replacer in muffins. *Food Hydrocolloids*, 77, 796-802.
- Oh, I., Lee, J., Lee, H. G. y Lee, S. (2019). Feasibility of hydroxypropyl methylcellulose oleogel as an animal fat replacer for meat patties. *Food Research International*, 122, 566-572.
- Orsavova, J., Misurcova, L., Ambrozova, J. V., Vicha, R. y Mlcek, J. (2015). Fatty acids composition of vegetable oils and its contribution to dietary energy intake and dependence of cardiovascular mortality on dietary intake of fatty acids. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(6), 12871-12890.
- Ozilgen, S., y Bucak, S. (2018). Functional biopolymers in food manufacturing. En A. M. Grumezescu y A. M. Holban (ed.), *Biopolymers for food design* (pp. 157-189). Academic Press.
- Patel, A. R., Cludts, N., Bin Sintang, M. D., Lesaffer, A. y Dewettinck, K. (2014). Edible oleogels based on water soluble food polymers: preparation, characterization and potential application. *Food & Function*, 5(11), 2833-2841.
- Patel, A. R. y Dewettinck, K. (2016). Edible oil structuring: an overview and recent updates. *Food & Function*, 7(1), 20-29.
- Patel, A. R., Lewille, B., Cludts, N., Bin Sintang, M. D., Lesaffer, A. y Dewettinck, K. (2014). Polysaccharide-based oleogels prepared with an emulsion-templated approach. *Chemphyschem. A European Journal of Chemical Physics and Physical Chemistry*, 15(16), 3435-3439.
- Patel, A. R., Rajarethinem, P. S., Cludts, N., Lewille, B., De Vos, W. H., Lesaffer, A. y Dewettinck, K. (2015). Biopolymer-based structuring of liquid oil into soft solids and oleogels using water-continuous emulsions as templates. *Langmuir. The ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 31(7), 2065-2073.
- Patel, A. R., Schatteman, D., Lesaffer, A. y Dewettinck, K. (2013). A foam-templated approach for fabricating organogels using a water-soluble polymer. *Rsc Advances*, 3(45), 22900-22903.
- Peng, X. y Yao, Y. (2017). Carbohydrates as fat replacers. *Annual Review of Food Science and Technology*, 8, 331-351.
- Plazzotta, S., Calligaris, S. y Manzocco, L. (2019). Structure of oleogels from κ -carrageenan templates as affected by supercritical-CO₂-drying, freeze-drying and lettuce-filler addition. *Food Hydrocolloids*, 96, 1-10.
- Puşcaş, A., Mureşan, V., Socaciu, C. y Muste, S. (2020). Oleogels in food: a review of current and potential applications. *Foods*, 9(1), 70. 1-27.
- Qiu, C., Huang, Y., Li, A., Ma, D. y Wang, Y. (2018). Fabrication and characterization of oleogel stabilized by gelatin-polyphenol-polysaccharides nanocomplexes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(50), 13243-13252.
- Romoscanu, A. I. y Mezzenga, R. (2006). Emulsion-templated fully reversible protein-in-oil gels. *Langmuir. The ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 22(18), 7812-7818.
- Saha, D. y Bhattacharya, S. (2010). Hydrocolloids as thickening and gelling agents in food: a critical review. *Journal of Food Science and Technology*, 47(6), 587-597.
- Shahidi, F. y Ambigaipalan, P. (2018). Omega-3 polyunsaturated fatty acids and their health benefits. *Annual Review of Food Science and Technology*, 9, 345-381.
- Singh, A., Auzanneau, F. I. y Rogers, M. A. (2017). Advances in edible oleogel technologies-A decade in review. *Food Research International*, 97, 307-317.
- Stortz, T. A. y Marangoni, A. G. (2013). Ethylcellulose solvent substitution method of preparing heat resistant chocolate. *Food Research International*, 51(2), 797-803.
- Tanti, R., Barbut, S. y Marangoni, A. G. (2016). Hydroxypropyl methylcellulose and methylcellulose structured oil as a replacement for shortening in sandwich cookie creams. *Food Hydrocolloids*, 61, 329-337.
- Utrilla, M. C., Ruiz, A. G. y Soriano, A. (2014). Effect of partial replacement of pork meat with an olive oil organogel on the physicochemical and sensory quality of dry-ripened venison sausages. *Meat Science*, 97(4), 575-582.
- Vieira, S. A., McClements, D. J. y Decker, E. A. (2015). Challenges of utilizing healthy fats in foods. *Advances in Nutrition*, 6(3), 309S-317S.
- Wijaya, W., Sun, Q. Q., Vermeir, L., Dewettinck, K., Patel, A. R. y Van Der Meer, P. (2019). pH and protein to polysaccharide ratio control the structural properties and viscoelastic network of HIPE-templated biopolymeric oleogels. *Food Structure*, 21, 100112.
- Winkler-Moser, J. K. y Mehta, B. M. (2015). Chemical composition of fat and oil products. En P. C. K. Cheung y B. M. Mehta (ed.), *Handbook of food chemistry. Springer Verlag* (pp. 365-403). Springer Reference.
- Ye, X., Li, P., Lo, Y. M., Fu, H. y Cao, Y. (2019). Development of novel shortenings structured by ethylcellulose oleogels. *Journal of Food Science*, 84(6), 1456-1464.
- Zambiasi, R. C., Przybylski, R., Zambiasi, M. W. y Mendonça, C. B. (2007). Fatty acid composition of vegetable oils and fats. *Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos*, 25(1), 111-120.
- Zetzl, A. K., Marangoni, A. G. y Barbut, S. (2012). Mechanical properties of ethylcellulose oleogels and their potential for saturated fat reduction in frankfurters. *Food & Function*, 3(3), 327-337.
- Zhu, X. J., Qiu, A. Y., y Jin, Q. Z. (2005). Preparation of shortenings based on stearin fractions of lard. *China Oils & Fats*, 30(8), 11-14.



Métodos de sanitización de semillas para consumo directo y de semillas para germinados

A.E. García-Santiesteban*, E. Palou y M.T. Jiménez-Munguía.

*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos
Correo electrónico: abril.garciasn@udlap.mx • mariat.jimenez@udlap.mx

RESUMEN

Las semillas y germinados son productos naturales cuya popularidad ha cobrado importancia entre consumidores debido a sus múltiples beneficios, tanto nutricionales como para la salud. Debido a su origen y cultivo en el campo, son alimentos con baja calidad microbiológica y alta probabilidad de contener microorganismos patógenos. Por ello, para prevenir afecciones a la salud de los consumidores, se han emitido recomendaciones para evitar su contaminación y asegurar el uso de desinfectantes en los casos aplicables. Sin embargo, este esfuerzo ha sido insuficiente. De acuerdo con cifras oficiales, los brotes de enfermedades producidos por el consumo de este tipo de alimentos prevalecen.

El objetivo de este artículo es presentar la información disponible sobre los métodos de sanitización probados, así como su eficacia, en semillas y germinados, con la finalidad de analizar su efectividad, ventajas y desventajas, y mostrar soluciones alternativas a los problemas de inocuidad en este tipo de productos de interés a nivel mundial.

Palabras clave: semillas, germinados, sanitización, *Salmonella spp.*, *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*.

ABSTRACT

Seeds and seed sprouts are natural products whose popularity has grown among consumers due to their many nutritional and health benefits. Given their origin and cultivation in the field, these are products with low microbiological quality and high probability of containing pathogens. In order to prevent health risks to consumers, recommendations have been issued to avoid their contamination. However, this effort has been insufficient. According to official information, disease outbreaks caused by the consumption of these types of foods still prevail.

This article aims to present available information on proven sanitation methods and their effectiveness, for seeds and seed sprouts, in order to analyze their effectiveness, advantages and disadvantages, and to display alternative solutions to this worldwide problem.

Keywords: seeds, sprouts, food safety, sanitization, *Salmonella spp.*, *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*.

INTRODUCCIÓN

Tanto las semillas de consumo directo como los germinados de semillas son alimentos con valor nutricional comprobado. Contienen abundantes vitaminas y minerales, además de altos niveles de proteínas (Ding *et al.*, 2013). Diversos estudios han confirmado sus importantes beneficios a la salud por sus propiedades anticolesterolémicas, antiartríticas y anticancerígenas (Kim *et al.*, 2019; Kumar *et al.*, 2006). Esto ha llevado a un incremento en la demanda y el consumo de semillas y sus germinados; sin embargo, a pesar de sus beneficios, las semillas son alimentos cuyo origen en el campo implica un alto riesgo de contaminación microbiológica con patógenos, por lo que han causado importantes brotes de enfermedades transmitidas por alimentos (ETA) (Yang *et al.*, 2013).

Para asegurar su inocuidad, el Departamento de Agricultura de Estados Unidos y la Administración de Alimentos y Medicamentos (USDA y FDA, respectivamente, por sus siglas en inglés) han emitido manuales de buenas prácticas agrícolas (BPA) para prevenir, en la medida de lo posible, la contaminación de estos alimentos con patógenos, como *Salmonella* spp., *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* y *Bacillus cereus* (Kim *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2013). Para el caso específico de los germinados, la FDA recomienda la desinfección de las semillas —principal fuente de contaminación— con una solución de hipoclorito de calcio que contenga 20,000 ppm de cloro libre. Sin embargo, este método de sanitización no suele ser utilizado para el grupo de semillas de consumo directo, como semillas de girasol, calabaza o sésamo, entre otras. Esto se debe a que la solución acuosa afecta el contenido de humedad de las semillas, reduciendo su periodo de almacenamiento y ocasionando cambios en detrimento de la calidad sensorial de las mismas. En lugar de ello, para este grupo de semillas se emplean comúnmente métodos térmicos, cuyo principal objetivo es disminuir el contenido de humedad de la semilla para alargar su vida útil y controlar la población microbiana (Himathongkham *et al.*, 2001; Kumar *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2013).

A pesar de estas recomendaciones, de acuerdo con información proporcionada por los Centros para el Control y

Prevención de Enfermedades (CDC, por sus siglas en inglés), cada vez es mayor el número de brotes de ETA por consumo de semillas. Se trata de un área de oportunidad importante en el aseguramiento de la inocuidad de estos alimentos, por lo que algunos investigadores se han interesado por el estudio y aplicación de nuevas tecnologías que aseguren una sanitización efectiva, mientras conserva las características nutricionales y sensoriales de las semillas (Himathongkham *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2013).

La presente revisión busca presentar la información disponible sobre los métodos de sanitización, así como su eficacia, en semillas y germinados, con la finalidad de analizar su efectividad, ventajas y desventajas, y mostrar soluciones alternativas a los problemas de inocuidad en este tipo de productos de interés a nivel mundial.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. Riesgos microbiológicos asociados con el consumo de semillas

Las principales fuentes de contaminación de las semillas se presentan durante la pre-cosecha y son todas aquellas a las que la semilla se encuentra expuesta durante su cultivo; como el agua de irrigación, heces de animales salvajes, excretas de aves, estiércol de ganado en abonos orgánicos y la propia calidad microbiológica del suelo de cultivo. Todo ello expone a la semilla a un amplio rango de contaminación por microorganismos patógenos (Martínez-Villaluenga *et al.*, 2008; Tamber *et al.*, 2016; Willis *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2013).

Durante la producción, los microorganismos patógenos se introducen en la microbiota de las semillas de diferentes maneras. La práctica frecuente del uso de estiércol como fertilizante representa una opción barata y fácil para mejorar la calidad del suelo. Sin embargo, el estiércol puede contener bacterias patógenas, como *Campylobacter* spp. y *Salmonella* spp., las cuales se introducen al suelo y después —por diversos factores— pueden migrar al producto (Yang *et al.*, 2013). Cuando animales domés-

ticos y salvajes tienen acceso al cultivo, la probabilidad de contaminación por patógenos aumenta por la presencia de heces de estos animales. Bacterias patógenas, como *Salmonella* spp. y *E. coli* O157:H7, pueden sobrevivir en restos de heces y en el suelo de cultivo por períodos de varios días, incluso meses. Se ha demostrado que *Salmonella* spp. puede sobrevivir hasta 60 días en heces durante el invierno; mientras que *E. coli* O157:H7 sobrevive por períodos de hasta 97 días en estiércol y suelo, y hasta 109 días en agua de riego (O'Neill *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2013).

Por otro lado, las características propias de la planta cobran relevancia. Por ejemplo, las semillas de girasol suelen tener mejor calidad microbiológica debido a que la mata puede medir hasta 2 metros de altura. Esta distancia que guarda del suelo le da una ventaja en comparación con semillas cuya planta tiene menor altura y cuya semilla se encuentra más cercana al suelo, como la semilla de chía o de alfalfa (Tamber *et al.*, 2016; Willis *et al.*, 2009).

La etapa de cosecha es otro punto crítico, puesto que durante este proceso las semillas suelen ser extendidas sobre el suelo, quedando expuestas a diversos factores de contaminación, como heces de roedores, aves, animales salvajes, entre otros, aumentando el riesgo de contaminación. Asimismo, tanto el equipo utilizado durante la cosecha como el sitio de almacenamiento y los contenedores en los que las semillas se almacenan o transportan, juegan un papel importante como factor de contaminación. Si estos no han sido adecuadamente lavados o sanitizados, pueden contribuir a la contaminación cruzada de patógenos en las semillas, tanto por presencia de microorganismos provenientes de lotes anteriores como por presencia de heces de roedores y otros animales que suelen introducirse en los mismos en búsqueda de comida (Yang *et al.*, 2013).

1.1. Riesgos microbiológicos presentes en la producción de semillas para consumo directo

Debido a que el contenido de humedad de este tipo de semillas, como la de girasol, calabaza, sésamo, chía, lino, entre otras, suele alcanzar niveles superiores al 20 % después de su cosecha, es común someterlas a un proceso térmico de secado con el objetivo

de disminuir su contenido de humedad a menos de 10 %. Este proceso suele involucrar la extensión de las semillas sobre el suelo para secarlas al sol directo, o deshidratarlas en horno con aire forzado, incrementando el riesgo de contaminación y disminuyendo su calidad microbiológica (Tamber *et al.*, 2016; Willis *et al.*, 2009).

En otros casos, la reducción de humedad se realiza junto con el proceso de tostado, el cual involucra un tratamiento térmico que puede no ser efectivo para la eliminación de bacterias, ya que el calor utilizado no siempre se encuentra en un rango de temperatura suficiente para asegurar la inactivación de todas las bacterias patógenas. Esto se debe a que muchas de las propiedades nutricionales, y algunas propiedades sensoriales, de las semillas pueden verse afectadas al utilizar las temperaturas efectivas para la inactivación de microorganismos patógenos (Willis *et al.*, 2009).

Aunque el riesgo microbiológico relacionado con el consumo de este tipo de semillas se encuentra ligado al origen de las mismas, existen pocos datos publicados sobre la calidad microbiológica de semillas secas comestibles. Un estudio realizado en 2009 en Gran Bretaña demostró que el consumo de semillas deshidratadas se asocia con un alto riesgo de salud pública debido a la alta probabilidad de contaminación con *Salmonella* spp. y *E. coli* a través de todas sus etapas, desde la producción hasta su consumo (Harvey *et al.*, 2016; Willis *et al.*, 2009).

En los últimos años, se han reportado diversos incidentes con *Salmonella* relacionados con semillas comestibles y sus productos. Uno de los más grandes –con implicaciones internacionales– se dio en el año 2001 y asociaba el consumo de semillas con *Salmonella* Typhimurium en Suecia, Noruega, Alemania y Australia (Harvey *et al.*, 2016; Willis *et al.*, 2009). Sin embargo, aunque ese brote encendió las alertas alimentarias a nivel mundial sobre el riesgo que representa este tipo de productos, la incidencia de este tipo de enfermedades por su consumo no ha disminuido. En la tabla I se incluyen los brotes más relevantes de ETA relacionados con la ingesta de semillas durante la última década. Como se observa, es importante establecer controles en la producción, métodos de inactivación microbiana y explorar nuevas alternativas para mejorar la inocuidad de las semillas de consumo directo.

Tabla I.

Brotes de enfermedades transmitidas por alimentos (ETA) durante la última década generados por bacterias tras el consumo de semillas y sus germinados

| Año | Factor etiológico | Casos | Hospitalizados | Decesos | Semilla | País | Referencia |
|------|--|-------|----------------|---------|--|---|--------------------------------|
| 2009 | <i>Salmonella</i> Bovismorbificans | 1 | 42 | - | Alfalfa | Finlandia | Yang <i>et al.</i> , 2013 |
| | <i>Salmonella</i> Cubana | 1 | 14 | - | Alfalfa | Canada | Yang <i>et al.</i> , 2013 |
| | <i>Salmonella</i> Saintpaul | 235 | 7 | - | Alfalfa | EE. UU. | CDC, 2020 |
| 2010 | <i>Salmonella</i> Bareilly | 1 | 190 | - | Alfalfa | G. B. | Yang <i>et al.</i> , 2013 |
| | <i>Salmonella</i> Newport | 1 | 28 | - | Soya | EE. UU. | Yang <i>et al.</i> , 2013 |
| | <i>Salmonella</i> Newport | 44 | 34 | - | Alfalfa | EE. UU. | CDC, 2020 |
| 2011 | <i>Escherichia coli</i> (STEC O145) | 1 | 3842 | 53 | Fenogreco | Alemania y Francia | CDC, 2020; ECDC, 2010 |
| | <i>Salmonella</i> serotipo I 4,[5],12:i: | 140 | 33 | - | Alfalfa | EE. UU. | CDC, 2020 |
| | <i>Salmonella</i> Enteritidis | 25 | 3 | - | Mix (alfalfa, rábano, fenogreco y trébol) | EE. UU. | CDC, 2020 |
| 2012 | <i>Escherichia coli</i> O26 (STEC O126) | 29 | 7 | - | Trébol | EE. UU. | CDC, 2020 |
| | <i>Escherichia coli</i> (STEC O145) | 18 | 4 | 1 | Trébol | EE. UU. | CDC, 2020 |
| 2013 | <i>Salmonella</i> Montevideo | 16 | 1 | 1 | Sésamo utilizado para Tahini | EE. UU. | CDC, 2020 |
| 2014 | <i>Salmonella</i> Enteritidis | 115 | 5 | - | Soya | EE. UU. | CDC, 2020 |
| | <i>Listeria monocytogenes</i> | 5 | 5 | 2 | Soya | EE. UU. | CDC, 2020 |
| | <i>Escherichia coli</i> O12 (STEC O121) | 19 | 9 | - | Trébol | EE. UU. | CDC, 2020 |
| | <i>Salmonella</i> spp. | 31 | 5 | - | Chía orgánica | EE. UU. | CDC, 2020 |
| | | 63 | 12 | - | Chía orgánica | Canadá | Public Health Agency of Canada |
| 2016 | <i>Salmonella</i> Muenchen | 26 | 8 | - | Alfalfa | EE. UU. | CDC, 2020 |
| | <i>Salmonella</i> Reading | 36 | 7 | - | Alfalfa | EE. UU. | CDC, 2020 |
| 2017 | <i>Salmonella</i> Enteritidis | 47 | 12 | - | Pasta de sésamo | Rep. Checa, Alemania, Grecia, G. B. | ECDC, 2010 |
| 2017 | <i>Salmonella</i> Agona | 122 | 11 | 1 | Mix semillas secas «ready to eat» | EE. UU., G. B., Finlandia, Dinamarca y Alemania | ECDC, 2010 |
| 2018 | <i>Salmonella</i> Montevideo | 10 | 0 | - | Trébol | EE. UU. | CDC, 2020 |
| 2020 | <i>Escherichia coli</i> | 10 | 5 | - | Semilla de girasol en ensaladas preparadas | EE. UU., Canadá | CDC, 2020 |

1.2. Riesgos microbiológicos presentes en la producción de semillas para germinados

El germinado de algunas semillas como la alfalfa, el trigo y la soya, entre otras, es de consumo común en diferentes países. Las principales fuentes de contaminación de los germinados se relacionan con los distintos factores a los cuales están expuestas las semillas durante su etapa de producción en el campo (Lorenzo-Leal *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2013).

Durante el proceso de producción de los germinados, las semillas se remojan en agua, posteriormente, se mantienen en condiciones de humedad y temperatura de incubación (20-40 °C) por períodos de 2 a 7 días. Estas condiciones son ideales, no solo para la germinación, sino también para la proliferación bacteriana (Weiss *et al.*, 2007). La etapa de germinación es crítica en el desarrollo de contaminación bacteriana, ya que algunas bacterias presentes en la semilla pueden internalizarse en los tejidos durante su germinación (Thomas *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2013). Diversos estudios han demostrado que la carga microbiana en las semillas suele estar entre 10^3 y 10^6 UFC/g, cuenta que puede incrementar entre 10^2 y 10^3 UFC/g durante el primer día de germinación, alcanzando poblaciones de hasta 10^9 UFC/g durante todo el período de germinación (Martínez-Villaluenga *et al.*, 2008; Weiss *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2013).

Para prevenir riesgos, la FDA recomienda a los consumidores cocinar los germinados para inhibir o eliminar la presencia de bacterias (Weiss *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2013). Sin embargo, se sigue prefiriendo su consumo crudo debido a que se preservan los nutrientes y glucosinolatos que contienen, los cuales son potentes antioxidantes y pueden inducir la apoptosis o muerte celular de células cancerígenas (Bellotas *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2013).

El número de brotes de E. coli causados por germinados de semillas ha ido en aumento durante la última década, siendo la alfalfa la fuente más común –como se puede observar en la tabla I–. En general, las bacterias patógenas o agentes etiológicos comúnmente asociados con los brotes son *Salmonella* spp., *Escherichia coli* O157, y *E. coli* O104:H4. Sin embargo, también se reporta la presencia de otros patógenos en semillas para germinados, como *Aeromonas hydrophila*, *Bacillus cereus*, *Listeria monocytogenes*, *Shigella* y *Staphylococcus aureus*, aunque en menor cantidad (Rosenquist *et al.*, 2005; Thomas *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2013).

Un estudio detallado sobre la flora bacteriana en germinados de alfalfa a la venta en California determinó que, dentro de

la flora nativa, se encuentran bacterias de los grupos *Proteobacteriaceae*, *Enterobacteriaceae* y *Moraxellaceae*. El mismo estudio demostró, además, que las condiciones de crecimiento y germinación de la alfalfa son ideales para el desarrollo de especies patogénicas como *E. coli* O157:H7 y *Salmonella* (Loui *et al.*, 2008; Weiss *et al.*, 2007).

2. Métodos térmicos de sanitización de semillas

La temperatura desempeña un papel vital en la afección de los mecanismos de supervivencia de los microorganismos patógenos, por lo que los tratamientos térmicos son efectivos para incrementar la seguridad microbiana de las semillas. En la última década, se han realizado diversos estudios sobre la eficacia de dos tipos de tratamiento térmicos para la inactivación de patógenos: calor seco y calor húmedo (Yang *et al.*, 2013). El primer tipo es más propicio para las semillas de consumo directo, mientras que el segundo ha sido estudiado principalmente en semillas para germinado.

2.1. Tipos de tratamientos térmicos

Las principales variables de control en este tipo de tratamientos son la temperatura y el tiempo, las cuales dependen de factores como el tipo de semilla, su composición y el microorganismo patógeno que se busca inactivar (Yang *et al.*, 2013). Estos tratamientos se pueden clasificar en tratamientos de calor seco y húmedo de acuerdo con el medio y fuente de calor. En la tabla II se comparan los métodos de todos aquellos ensayos donde se obtuvo una reducción mayor a 10^4 UFC/g del patógeno estudiado en semillas.

2.1.1. Calor seco

Se han observado variables en la eficacia desinfectante del tratamiento de semillas a temperaturas alrededor de 50 °C por períodos prolongados de tiempo –desde varias horas hasta días– (Ding *et al.*, 2013). Una temperatura de 50 °C resultó adecuada para reducir la presencia de *E. coli* O157:H7 a niveles debajo de los detectables en semillas de rábano, brócoli y alfalfa. Sin embargo, los tiempos de tratamiento necesarios fueron prolongados, variando entre las 17 y 24 horas. Con estas mismas condiciones, no se lograron resultados significativos en la reducción de *E. coli* O157:H7 en semillas de frijol mungo (Bari *et al.*, 2010). Asimismo, otro estudio realizado por Hu *et al.* (2004), reportó una reducción de 10^5 UFC/g de *E. coli* y de 10^3 UFC/g de *Salmonella* en el mismo tipo de frijol, utilizando una temperatura de 55 °C. De manera similar, Feng *et al.*

Tabla II.

Métodos y condiciones de sanitización que cumplen el criterio del Comité Consultivo Nacional sobre Criterios Microbiológicos para Alimentos (NACMCF) sobre una reducción logarítmica mínima de 10^4 CFU/g

| Método de Sanitización | Semilla | Condiciones de tratamiento | Patógenos | Reducción logarítmica (CFU/g) | Referencia |
|---|-----------------------|--|--|-------------------------------|-----------------------------|
| <i>Métodos térmicos</i> | | | | | |
| Calor seco | Alfalfa y brócoli | 50 °C/17 o 24 h | <i>Escherichia coli</i> O157:H7 | 5 | Bari, Sugiyama et al., 2009 |
| | Frijol mungo | 55 °C/4 d | <i>E. coli</i> O157:H7 | 5 | Hu et al., 2004 |
| | Frijol mungo | 55 °C/4 d | <i>Salmonella</i> Typhimurium | 3 | Hu et al., 2004 |
| | Alfalfa y brócoli | 55 °C/6 d | <i>E. coli</i> O157:H7 | 8 | Feng et al., 2007 |
| | Alfalfa y brócoli | 55 °C/6 d | <i>Salmonella</i> Typhimurium | 8 | Feng et al., 2007 |
| Calor húmedo | Frijol mungo | 85 °C, 40 s/30 s agua fría 2 h agua con 2,000 ppm de cloro | <i>E. coli</i> O157:H7 y <i>Salmonella</i> spp | >6 | Bari et al., 2008 |
| <i>Métodos térmicos (calor húmedo) + otro</i> | | | | | |
| + Choque térmico | Frijol mungo | 90 °C, 90 s/30 s agua fría | <i>E. coli</i> O157:H7 y <i>Salmonella</i> spp | >6 | Bari, Nei et al., 2010 |
| <i>Métodos térmicos (calor seco) + otro</i> | | | | | |
| + Agentes químicos | Alfalfa | 50 °C/17 h y 1 % ácido oxálico, 0.03 % ácido fítico, 50 % etanol | <i>E. coli</i> O157:H7 | >5 | Bari, Nei et al., 2009 |
| + Irradiación | Rábano y frijol mungo | 50 °C/17 h y 1 kGy | <i>E. coli</i> O157:H7 | >6 | Bari Nei et al., 2009 |
| | Brócoli y alfalfa | 50 °C/17 h y 0.25 kGy | <i>E. coli</i> O157:H7 | >6 | Bari Nei et al., 2009 |
| <i>Métodos químicos</i> | | | | | |
| Ca(OCl) ₂ | Alfalfa | 10 min | <i>Salmonella</i> Stanley | 5 | Gandhi y Mathews, 2003 |
| | Alfalfa | 15 min | <i>E. coli</i> O157:H7 | 5 | Lang et al., 2000 |
| ClO ₂ | Rábano | 500 µg/ml, 5 min + 70 °C, 48 h. | <i>E. coli</i> | 6* | Bang et al., 2011 |
| CO ₂ | Alfalfa | 60 °C, 30 min, ozono rebombeado | <i>E. coli</i> O157:H7 | 4.8* | Sharma et al., 2002 |
| EO <i>carvacrol</i> acidificado | Frijol mungo | Aplicado en nanoemulsión | <i>Salmonella</i> enterica | 4 | Landry et al., 2006 |
| Ácido acético gaseoso | Rábano y alfalfa | 8.7 % (v/v), 55 °C, 3 h | <i>E. coli</i> O157:H7 y <i>Salmonella</i> spp | >5 | Nei et al., 2011 |
| Ácido málico | Alfalfa | 10 % ácido málico, 1 % TDS | <i>E. coli</i> O157:H7 | 4* | Fransisca et al., 2011 |

Tabla II. Métodos y condiciones de sanitización que cumplen el criterio del Comité Consultivo Nacional sobre Criterios Microbiológicos para Alimentos (NACMCF) sobre una reducción logarítmica mínima de 10^4 CFU/g (continuación)

| Método de Sanitización | Semilla | Condiciones de tratamiento | Patógenos | Reducción logarítmica (CFU/g) | Referencia |
|-------------------------------|-----------------------|--|--|-------------------------------|---------------------------|
| <i>Tecnologías emergentes</i> | | | | | |
| PLAI | Alfalfa | 8 cm, 90 s | <i>E. coli</i> O157:H7 | >4 | Sharma y Demirci, 2003 |
| | Chía | 15 s, fluencia 19.35 J/cm ² | <i>Salmonella</i> Typhimurium | 4 | Reyes-Jurado et al., 2019 |
| APH | Berro | 300 MPa, 15 min, 4 °C | <i>Salmonella</i> Typhimurium, <i>E. coli</i> MG1655 y <i>Listeria innocua</i> | 6 | Wuytack et al., 2003 |
| | Alfalfa | 650 MPa, 15 min, 20 °C | <i>E. coli</i> O157:H7 | >5 | Neetoo et al., 2008 |
| | Alfalfa | 550 MPa, 2 min, 40 °C | <i>E. coli</i> O157:H7 | >5 | Neetoo et al., 2009 |
| | | - | <i>Shigella flexneri</i> y <i>E. coli</i> LMM1010 | 4 | Wuytack et al., 2003 |
| SC-CO ₂ | Alfalfa | 4000 psi, 50 °C, 60 min | <i>E. coli</i> K12 | >4 | Jung et al., 2009 |
| Radiaciones ionizantes | Germinados de alfalfa | 3.3 kGy | <i>L. monocytogenes</i> | 6 | Schoeller et al., 2002 |
| | Germinados de alfalfa | 0.5 kGy | <i>Salmonella enterica</i> | >4 | Rajkowski et al., 2003 |
| | Germinado de brócoli | 1 kGy | <i>L. monocytogenes</i> | 4.88 | Bari et al. 2005 |
| | Frijol mungo | 1 kGy | <i>L. monocytogenes</i> | 4.57 | Bari et al. 2005 |

Abreviaciones utilizadas: hipoclorito de calcio (Ca(OCl)₂), dióxido de cloro (ClO₂), aceites esenciales (EO, por sus siglas en inglés), pulsos de luz de alta intensidad (PLAI), altas presiones hidrostáticas (APH), dióxido de carbono supercrítico (SC-CO₂).

*En estos estudios se comprobó que, a pesar de las altas reducciones logarítmicas en las poblaciones bacterianas, estas alcanzaron niveles superiores a los 10^6 CFU/g durante la etapa de germinación de las semillas.

(2007) lograron reducciones de 10^2 y 10^8 UFC/g, respectivamente, para *Salmonella* y *E. coli* O157:H7, pero utilizando semillas de alfalfa, y tiempos de hasta 6 días (Feng et al., 2007; Hu et al., 2004). Esto indica que es difícil estandarizar las variables de control, ya que la respuesta dependerá, en gran medida, de la composición y estructura de la semilla utilizada, así como del mecanismo de supervivencia aplicado por el patógeno objetivo.

Por otro lado, un tratamiento rápido a temperaturas superiores a los 90 °C durante 90 segundos, seguido de un choque térmico, a 0 °C por 30 segundos, mejoró la desinfección, logrando reducciones de 6.08 UFC/g y 5.3 UFC/g en las poblaciones iniciales de *E. coli* y *Salmonella* spp., respectivamente. Este método reportó incluso la inactivación total de dichos patógenos, mientras que los tratamientos a menores temperaturas y tiempos más

prolongados, alcanzaron reducciones máximas de 4 UFC/g, sin lograr la total inactivación de los patógenos (Bari *et al.*, 2008). Sin embargo, debido a la disminución en las tasas de germinación en temperaturas mayores a 75 °C, este método no es aplicable para su uso en semillas para germinados (Bari, Nei *et al.*, 2009), pero podría utilizarse para semillas de consumo directo.

En el caso particular de semillas para consumo directo, su tostado implica una serie de reacciones de oscurecimiento que, aunque en muchos casos mejoran sus características sensoriales, también afectan la composición química de las semillas. En un estudio realizado en chía sobre el efecto del tostado a diferentes temperaturas (160-200 °C) por 5 a 15 minutos, se demostró que la capacidad de retención de agua de la semilla cambió rápidamente a los 180 °C, indicando que a dicha temperatura se producen cambios químicos en la estructura del mucílago. Estos cambios pueden impactar en las características sensoriales, nutricionales y tecnológicas buscadas en esta semilla para su aplicación en diversas áreas (Song *et al.*, 2018).

En muchos casos, la combinación de diferentes tipos de tratamiento puede llevar no solo a mejores resultados en cuanto a la inactivación microbiológica, sino también respecto a la preservación de las características sensoriales y nutricionales propias del producto. Por ejemplo, la combinación de tratamientos prolongados (17 horas) de calor seco a 50 °C con tratamientos químicos (1 % ácido oxálico, 0.03 % ácido fítico, 50 % etanol) dio como resultado la reducción a niveles no detectables de *E. coli* O157:H7 inoculada en semillas de alfalfa (mayor a 10⁵ UFC/g), rábano y brócoli, sin comprometer la calidad sensorial de sus germinados. Sin embargo, estas mismas condiciones no fueron suficientes para eliminar completamente el patógeno en semillas de alfalfa y rábano, en cuyos germinados se alcanzó una población de 10⁷ UFC/g de *E. coli* O157:H7 posterior a su germinación. La aplicación de calor seco bajo estas condiciones, más una dosis de irradiación de 1.0 kGy, eliminó por completo la población de *E. coli* O157:H7 en semillas de rábano y frijol mungo, mientras que una radiación mínima de 0.25 kGy fue suficiente para eliminar el patógeno en las semillas de brócoli y alfalfa. La combinación de calor seco con radiación a dichas dosis, no afectó significativamente la tasa de germinación de las semillas de alfalfa, brócoli o rábano, pero sí disminuyó el tamaño de los brotes de frijol mungo (Bari, Nei, *et al.*, 2009).

2.1.2. Calor húmedo

Los tratamientos con calor húmedo pueden emplear agua caliente o vapor de agua. La desinfección con agua caliente fue uno de los primeros tratamientos estudiados y aplicados para la sanitización de semillas para germinados. Sin embargo, este tipo de tratamientos muestra una pérdida de viabilidad de la semilla cuando se utilizan tiempos prolongados y temperaturas elevadas (Yang *et al.*, 2013).

Algunos tratamientos con calor húmedo suelen implicar un choque térmico, mientras que otros añaden el uso de algún químico para reforzar el efecto inhibitorio. Un estudio en frijol mungo con un tratamiento con agua caliente a 85 °C por 40 segundos, seguido de la inmersión de la semilla en agua fría por 30 segundos y por 2 horas en agua con 2,000 ppm de cloro, logró una reducción hasta límites no detectables de *E. coli* O157:H7 y *Salmonella* spp. Se obtuvo el mismo resultado cuando este frijol fue tratado en agua a 90 °C durante 90 segundos, seguido por la inmersión del mismo en agua fría por 30 segundos. Ambos tratamientos lograron la desinfección de la semilla, sin una reducción significativa en el porcentaje de germinación del frijol mungo (Bari *et al.*, 2010; Bari *et al.*, 2008).

Los tratamientos con calor húmedo pueden ser aplicables, de igual manera, en el germinado, tal como han demostrado algunos estudios (Pao *et al.*, 2008). Sin embargo, el alcance de esta revisión se limita a los métodos de desinfección de las semillas.

3. Métodos químicos

Se han observado un gran número de métodos químicos para la desinfección de semillas, utilizando diversos agentes químicos como cloro, agua electrolizada, ozono y otros compuestos ácidos (Yang *et al.*, 2013). Los agentes químicos más utilizados para la desinfección de semillas suelen tener resultados altamente variables (Ding *et al.*, 2013).

3.1. Cloro, dióxido de cloro e hipoclorito de sodio y de calcio

El cloro es el agente químico más ampliamente utilizado para sanitizar productos frescos. Para el caso específico de las semillas para germinados, la FDA recomienda el uso de soluciones de 20,000 ppm de cloro activo, como hipoclorito de calcio (Ca [OCl]₂), durante 15 minutos. Además, recomienda monitorear la calidad microbiológica del agua de irrigación para mitigar los riesgos de E. coli con relación al consumo de germinados (Yang *et al.*, 2013).

Las semillas de alfalfa inoculadas con *Salmonella* Stanley y tratadas con 20,000 ppm de $\text{Ca}(\text{OCl})_2$ durante 10 minutos a temperatura ambiente, tuvieron una reducción de más de 10^5 UFC/g de la población inoculada, hasta alcanzar niveles no detectables. Sin embargo, durante la etapa de germinación, la población de este microorganismo alcanzó rápidamente cuentas superiores a 10^7 UFC/g en germinados de 2 días (Gandhi y Matthews, 2003). Estos resultados se encuentran en concordancia con los reportados por Lang *et al.* (2000). En ese estudio, las semillas de alfalfa inoculadas con *E. coli* O157:H7 fueron tratadas por 15 minutos a temperatura ambiente, alcanzando una reducción hasta niveles no detectables; pero estos mismos niveles incrementaron hasta 10^8 UFC/g durante el germinado, por lo que concluyeron que el tratamiento no logró garantizar la muerte total de los patógenos presentes en la semilla.

Se ha observado también que la inmersión de semillas de trigo y de sus germinados en una solución con una concentración de hipoclorito de sodio con 400 ppm durante 30 minutos, seguida de un enjuague con agua corriente durante 3 minutos, logró una reducción de 1.03 ciclos logarítmicos de *E. coli*, sin impacto en la capacidad de germinación de las semillas (Tornuk *et al.*, 2011).

En años recientes, se han investigado los efectos de la aplicación de cloro en forma de dióxido de cloro (ClO_2), con resultados prometedores en la eliminación de patógenos en semillas para germinados. El ClO_2 se diferencia del hipoclorito, no solo en su formulación química, sino también porque se encuentra en estado gaseoso a temperatura ambiente. Bang *et al.* (2011) utilizaron ClO_2 en combinación con un tratamiento térmico, reportando una reducción de 5.9 ciclos logarítmicos de *E. coli* en semillas de rábano tratadas con 500 $\mu\text{g}/\text{ml}$ de ClO_2 por 5 minutos, secadas a 45 °C durante 24 horas y, por último, sometidas a un tratamiento térmico con calor seco a 70 °C por 48 horas.

Se ha demostrado que, cuando la carga microbiana inicial es alta, el cloro es inefectivo en la sanitización de alimentos. Semillas de alfalfa, inoculadas con cargas iniciales de 10^6 UFC/g de *E. coli* O157:H7, fueron sometidas a tratamientos de lavado con 10 mg/l de ClO_2 entre 3 y 10 minutos a 21 °C. La máxima reducción microbiana obtenida bajo estas condiciones fue de 1.24 ciclos logarítmicos. También se observó que la población de *E. coli* incrementó rápidamente a niveles similares a los del control durante la etapa de germinación de semillas tratadas, por lo que estos resultados se consideran insuficientes para lograr la inocuidad de estas semillas con este método y bajo

estas condiciones (Singh *et al.*, 2003). El tratamiento con una concentración de entre 200 y 20,000 ppm de hipoclorito de sodio (NaOCl), durante 20 minutos, logró una reducción máxima de 1.64 ciclos logarítmicos de *E. coli* O157:H7 en semillas de rábano. Sin embargo, el conteo incrementó rápidamente a niveles incluso mayores que los del control durante el germinado (Fransisca *et al.*, 2011).

Estos resultados son desalentadores, pues reflejan que una reducción de patógenos en la semilla no garantiza la inocuidad del producto final. Esto se debe a la proliferación de los mismos microorganismos durante el germinado, etapa en la cual la disponibilidad de nutrientes y condiciones físicas del medio favorecen su desarrollo. La superficie propia de cada semilla puede facilitar que algunas células bacterianas se protejan en grietas, poros y escamas; lo cual ocasiona que las soluciones tengan limitaciones para alcanzar todos los sitios de desinfección. Es posible que ahí radique la falta de consistencia y efectividad en los resultados obtenidos de estos métodos, puesto que se observan mayores reducciones en semillas de superficie lisa. Sin embargo, la ventaja de este método radica en que este tipo de tratamientos no tiene ningún efecto en la tasa de germinación de las semillas (Ding *et al.*, 2013).

Considerando estas limitaciones, se están realizando estudios explorando otros posibles tratamientos, como el uso de ozono, aceites esenciales en fase de vapor, agua electrolizada y otros agentes químicos, con el objetivo de mejorar las técnicas convencionales de descontaminación.

3.2 Ozono

El tratamiento con ozono ofrece diversas ventajas, en comparación con los tratamientos químicos convencionales, como su eficacia antimicrobiana a concentraciones relativamente bajas y con cortos períodos de exposición. Además de su descomposición espontánea en O_2 , la cual permite que al final del proceso no queden residuos químicos que puedan representar un riesgo adicional para la salud o el medio ambiente (Yang *et al.*, 2013).

Un estudio realizado en germinados de alfalfa y de rábano inoculados con *Shigella* demostró que la inmersión de los germinados en agua con una concentración de ozono de 2 ppm durante 5 minutos logra reducciones $<10^2$ UFC/g. Sin embargo, utilizando la misma concentración de ozono en combinación con un 2 % de ácido málico, se maximiza la inhibición de *Shigella*, por lo que los autores del estudio lo sugieren como

una potencial opción comercial para el control de *Shigella* en germinados crudos (Singla *et al.*, 2011). A pesar de ello, otro estudio realizado en alfalfa inoculada con *E. coli* O157:H7 y tratada con ozono en una concentración de 21 ppm no logró una reducción significativa en comparación con el control, a pesar del tiempo de tratamiento (2-64 minutos). Es probable que esto se deba a la rápida disminución de la concentración de ozono tras el contacto con la superficie del germinado. Sin embargo, otro estudio con recirculación de ozono a 60 °C por 3 horas tuvo éxito, al lograr una reducción de 4.8 ciclos logarítmicos de *E. coli* O157:H7 en semillas de alfalfa (Sharma *et al.*, 2002).

3.3. Agua electrolizada

El agua electrolizada se genera por electrólisis de una solución de NaCl, se puede dividir en alcalina y ácida, dependiendo del pH de la solución, y puede tener diferentes propiedades, como el potencial de óxido-reducción y la concentración del ion Cl en ella (Liu y Yu, 2017). El agua electrolizada ácida (AEW, por sus siglas en inglés) es la más investigada como una alternativa novedosa a otros métodos químicos de desinfección. Se caracteriza por un pH menor a 2.7, un alto potencial de óxido-reducción (>1000 mV), concentraciones de Cl de entre 40-90 ppm y un amplio espectro antibacteriano comparado con otros tratamientos antimicrobianos (Yang *et al.*, 2013; Zhang, Lu, Li, Shang, Zhang y Cao, 2011). A pesar de sus ventajas, se ha demostrado que su efecto es limitado sobre *E. coli* O157:H7 en semillas de alfalfa, cuya reducción alcanzada fue de 2.72 ciclos logarítmicos en tratamientos con constante agitación por 2, 4, 8, 16, 32 y 64 minutos totales (Sharma y Demirci, 2003). Dichos niveles son comparables con el tratamiento clásico con 2000 ppm de hipoclorito de sodio, pero con la desventaja de que el agua electrolizada puede afectar la viabilidad de las semillas debido al pH fuertemente ácido (Fransisca *et al.*, 2011; Len *et al.*, 2002; Liu y Yu, 2017; Yang *et al.*, 2013).

3.4. Aceites esenciales

Los aceites esenciales (EO, por sus siglas en inglés) son compuestos aromáticos derivados de diversas partes de plantas, como flores, brotes, semillas, hojas, ramas, hierbas, madera, frutas y raíces. Su actividad antimicrobiana contra patógenos presen-

tes en alimentos ha sido ampliamente estudiada (Burt, 2004; Lee *et al.*, 2018). Se ha observado que los EO de pimienta, tomillo, romero y orégano han tenido comprobada efectividad contra diferentes cepas, como *L. monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus epidermidis*, *Micrococcus luteus*, *Bacillus cereus*, *E. coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Enterococcus faecalis*, *Vibrio alginolyticus*, *Salmonella Typhimurium*, *Rhizoctonia solani*, *Macrophomia phaseolina*, *Salmonella Senftenberg*, *Aspergillus ochraceus*, *A. parasiticus*, y *A. niger* (Burt, 2004; Kotan, *et al.*, 2013; Lorenzo-Leal *et al.*, 2019).

Los EO de orégano, tomillo y corteza de canela aplicados en fase vapor demostraron tener una fuerte actividad antimicrobiana contra *Listeria monocytogenes* en medio de cultivo (MIC y MLC 78.1 µl/l). Estos mismos aceites aplicados en la superficie de germinados de rábano en concentraciones de 156 µl/l durante 24 horas a 30 °C y 43 % HRE, lograron reducciones de *L. monocytogenes* de hasta 2.1 ciclos logarítmicos. Bajo las mismas condiciones y con una concentración de 625 µl/l se lograron reducciones entre 2.7 y 3 ciclos logarítmicos. Sin embargo, estos resultados no aseguran la inactivación total del patógeno, por lo que su aplicación bajo estas condiciones no asegura la inocuidad de los germinados (Lee *et al.*, 2018). Un estudio realizado con EO de pimienta, tomillo y romero en fase de vapor aplicados en semillas de alfalfa inoculadas con *Salmonella Typhimurium* y *Listeria monocytogenes* concluyó que el aceite de tomillo es el más efectivo del grupo para inhibir el crecimiento de ambos patógenos. Con una dosis de 4.0 ml/l se inhibió significativamente el crecimiento de ambas bacterias en las semillas durante su germinación, sin tener ningún efecto negativo en la tasa de germinación o en las propiedades sensoriales de los germinados (Lorenzo-Leal *et al.*, 2019). Estos resultados concuerdan con estudios que demuestran que la aplicación en fase de vapor ejerce actividad antimicrobiana en áreas mayores que en fase líquida. Asimismo, se ha observado que algunos EO son más efectivos contra bacterias y organismos deteriorativos cuando se aplican en fase gaseosa que en fase líquida (Lee *et al.*, 2018; Seo *et al.*, 2015).

Los EO también pueden ser aplicados por medio de nanoemulsiones. Landry *et al.* (2016) aplicaron carvacrol acidificado (50 mM ácido levulínico) por medio de nanoemulsiones en

semillas de brócoli y de frijol mungo con el objetivo de inactivar *Salmonella enterica* Enteriditis, previamente inoculada en las semillas. Los resultados mostraron una reducción de 10^4 UFC/g de *Salmonella* en frijol mungo y de 10^2 UFC/g en semilla de brócoli. En el primer caso, no se detectó presencia del patógeno en el germinado de las semillas tratadas por 30 minutos con la nanoemulsión (Landry *et al.*, 2016).

Una de las principales ventajas que ofrecen estos compuestos en su aplicación es que muchos de los aceites estudiados han sido reconocidos como compuestos naturales y seguros, por lo que podrían ser una alternativa que reemplace los conservadores químicos (Lee *et al.*, 2018). Sin embargo, la presencia de olores y sabores fuertes podría ser un obstáculo para su aplicación por sus efectos en las propiedades organolépticas (Lee *et al.*, 2018; Seo *et al.*, 2015; Tyagi *et al.*, 2012).

3.5. Compuestos ácidos

Los compuestos ácidos tienen un alto efecto antimicrobiano atribuido principalmente a la forma disociada de este tipo de moléculas, las cuales se mueven a través de la membrana celular y liberan protones estando ya en el citoplasma, reduciendo así el pH celular, inactivando enzimas intracelulares, inhibiendo mecanismos de transporte de nutrientes y disminuyendo las reservas energéticas de la célula. Este es uno de los mecanismos por los cuales ciertas frutas con altos contenidos de ácidos orgánicos son más resistentes a la contaminación bacteriana (Yang *et al.*, 2013).

El tratamiento de semillas de rábano y de alfalfa con 8.7 % (v/v) de ácido acético en estado gaseoso a 55 °C por un periodo de entre 2 y 3 horas demostró efectividad para reducir poblaciones mayores a 10^5 UFC/g de *E. coli* y *Salmonella* spp. en ambos tipos de semillas. Por otra parte, con 48 horas de tratamiento se obtuvo la inhibición total de *E. coli*, aun después de la etapa del enriquecimiento. Sin embargo, ninguna de las condiciones estudiadas tuvo éxito en eliminar por completo la población de *Salmonella* (Nei *et al.*, 2011). A pesar de ello, este tratamiento es más eficiente que el recomendado con 20,000 ppm de hipoclorito de calcio, que como ya se describió previamente, puesto que obtiene reducciones menores a 10^2 UFC/g para ambas especies.

No obstante, el punto débil de la desinfección con compuestos ácidos sigue siendo la etapa de germinación. Otros estu-

dios han comprobado que, a pesar del éxito obtenido, la cuenta microbiana se eleva considerablemente durante la germinación de la semilla (Singh *et al.*, 2005). El uso de ácido peroxiacético (PAA) tiene una efectividad similar a la del uso de 20,000 ppm de cloro, con una reducción de *Salmonella* spp. y *E. coli* O157:H7 apenas un poco mayor que 1 ciclo logarítmico en semillas de alfalfa tratadas con concentraciones de entre 1-3 % de PAA por tiempos variables entre 10 a 20 minutos, sin que se observaran reducciones mayores con el incremento en el tiempo de tratamiento o en la concentración de PAA (Rajkowski y Ashurst, 2009). La utilización de ácido láctico al 5 % durante 10 minutos a 42 °C redujo hasta límites no detectables la población de *Salmonella* spp., sin embargo, esta alcanzó niveles superiores a 10^7 UFC/g durante la germinación, indicando que la inactivación total de dicho patógeno no se alcanzó (Lang *et al.*, 2000).

Por su parte, Chang *et al.* (2010) investigaron la eficiencia del ácido caprílico (AC) y monocaprílico (MC) a concentraciones entre 25 y 75 mM, a 4 °C y tiempos entre 30 y 90 minutos, para la desinfección de semillas de alfalfa previamente inoculadas con *Salmonella* spp. y *E. coli* O157:H7. Aunque los resultados demostraron que concentraciones mayores y tiempos más prolongados mejoraban la reducción bacteriana, tanto el AC como el MC tenían un efecto bacteriano limitado con una máxima reducción de 1.56 ciclos logarítmicos para *E. coli* O157:H7 y de 2.56 ciclos logarítmicos para *Salmonella* spp (Chang *et al.*, 2010). Con la aplicación de 10 % de ácido málico (AM) con 1 % de TDS (sulfato de dilauril tiamina), se obtuvo una reducción de *E. coli* O157:H7 de una población inicial de 10^4 UFC/g a niveles por debajo de los detectables. Sin embargo, esta misma población aumentó a 10^7 - 10^8 UFC/g tras la etapa de germinación de la semilla (Fransisca *et al.*, 2011).

4. Tecnologías emergentes

Muchos estudios realizados recientemente emplean tratamientos físicos, como altas presiones, irradiación, tratamientos con dióxido de carbono supercrítico (sc-CO₂), pulsos de luz de alta intensidad, entre otras tecnologías, con el objetivo de reducir o eliminar los patógenos presentes en semillas para germinados y consumo directo.

4.1. Pulsos de luz de alta intensidad

Los pulsos de luz de alta intensidad (PLAI), utilizan pulsos de luz de amplio espectro ricos en luz ultravioleta de onda corta (uv-c) para la desinfección de superficies. Se ha probado que resultan más eficientes para la sanitización de alimentos que los tratamientos convencionales con luz uv-c debido a su mecanismo de acción, que actúa sobre la estructura de ADN de las bacterias, impidiendo su replicación (Demirci y Keklik, 2012; Gómez-López *et al.*, 2007). Los PLAI se producen utilizando tecnología que multiplica la potencia de emisión de luz por el almacenamiento de electricidad en un capacitor por períodos de tiempo relativamente largos para, posteriormente, liberarlos en millonésimas de segundo (Fernández Molina *et al.*, 2001; Gómez-López *et al.*, 2007; Rowan, 2019). Los PLAI fueron aprobados por la FDA para la producción, procesamiento y manejo de alimentos, en 1999. La dosis acumulada permitida de uv es de hasta 12 J/cm² con el espectro de emisión entre 200 y 1100 nm (Demirci y Keklik, 2012; Fernández Molina *et al.*, 2001).

A pesar de que se trata de una tecnología que está siendo ampliamente investigada, no existen suficientes estudios sobre su aplicación en semillas para la inactivación de patógenos (Gómez-López *et al.*, 2007). Uno de los primeros estudios, realizado por Sharma y Demirci (2003), demostró que un tratamiento por 90 segundos a una distancia de 8 centímetros de la fuente logra una reducción mayor a 10⁴ UFC/g en semillas de alfalfa inoculadas con *E. coli* O157:H7. El modelo matemático desarrollado en este estudio permitió optimizar el proceso para lograr obtener una reducción de hasta 8 ciclos logarítmicos del patógeno estudiado; sin embargo, estas condiciones optimizadas no se comprobaron experimentalmente. Este estudio también demostró que el grosor de la muestra es un factor relevante, dado que una de las variables de estudio fue el grosor de la capa de semillas de alfalfa. Los resultados mostraron que este factor afecta significativamente, reduciendo la efectividad del tratamiento a mayor grosor de la capa distribuida de la muestra.

Kim *et al.* (2019) estudiaron la aplicación de PLAI en semillas de rábano y *pak choi* para la reducción de la cuenta bacteriana de estas semillas. Las condiciones del tratamiento incluyeron

una distancia fija de 20 centímetros de la fuente lumínica y tiempos entre 0-180 segundos (fluencia de 0 a 37.80 J/cm²). El tiempo, 180 segundos, brindó la mejor inhibición bacteriana, con una reducción de 1.41 ciclos log UFC/g de mesófilos aerobios en las semillas de rábano, y 1.78 ciclos log UFC/g en las semillas de *pak choi*. Ninguna de las condiciones mostró un efecto significativo en la tasa de germinación de las semillas. Sin embargo, el mayor efecto inhibitorio de bacterias se dio en una fluencia mayor al límite máximo permitido por la FDA (12 J/cm²) (Kim *et al.*, 2019). Por su parte, Hwang *et al.* (2017) estudiaron la aplicación de esta tecnología para la descontaminación de semillas de sésamo, obteniendo una reducción máxima de 1.46 ciclos log UFC/g en semillas cuya carga inicial de mesófilos aerobios se encontraba entre 10⁴-10⁵ UFC/g, con 120 segundos de tratamiento.

Una de las complicaciones que presenta este método es el tipo de equipo disponible para su aplicación, puesto que resulta complicado asegurar la distribución uniforme de los pulsos de luz por todas las caras del alimento. El estudio realizado por Hwang *et al.* (2017) resulta valioso en este sentido también, puesto que propone un diseño de equipo de flujo continuo para la aplicación de los PLAI. Sin embargo, se requieren más estudios en equipos con este diseño para comprobar si existe una diferencia significativa en su efecto descontaminante para el caso específico de semillas (Hwang *et al.*, 2017).

Reyes-Jurado *et al.* (2019) aplicaron la tecnología de PLAI en semillas de chía inoculadas con *Salmonella Typhimurium*, obteniendo una reducción de 10⁴ UFC/g con un tratamiento de 15 segundos (19.35 J/cm²). La relevancia de este estudio se debe a que la chía es una semilla cuya desinfección por otros métodos es complicada, ya que una elevada humedad produce la absorción de agua por parte del mucílago contenido en la semilla, lo que lleva a una alteración en las características fisicoquímicas y sensoriales en la semilla. Este es un claro ejemplo de que los PLAI pueden ser una novedosa alternativa para la desinfección de semillas sin producir cambios en sus propiedades.

Una de las principales desventajas del uso de esta tecnología es el «efecto de sombra» que se da en algunas superficies

rugosas o porosas de los alimentos. Debido a esto, las bacterias encuentran refugio en la topografía característica del alimento, volviendo a este método menos efectivo. Por otro lado, tratamientos prolongados pueden producir un calentamiento en el producto, lo que podría afectar la composición y características de textura del producto (Gómez-López *et al.*, 2007; Sharma y Demirci, 2003).

4.3. Altas presiones hidrostáticas

El uso de altas presiones hidrostáticas (APH) es un método no térmico novedoso, cuya eficacia para inactivar patógenos sin alterar sus propiedades sensoriales y nutricionales en diversos alimentos ha sido comprobada (Rendueles *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2013).

Los primeros estudios para la aplicación de esta tecnología en la descontaminación de semillas fueron realizados por Wuytack *et al.* (2003) y Ariefdjohan *et al.* (2006). Una de las principales conclusiones alcanzadas en sus investigaciones fue que la efectividad de los tratamientos con APH se encuentra también en función de la temperatura, presión, tiempo de exposición, pretratamiento y tipo de semilla.

De igual manera, la efectividad del tratamiento de las APH depende de la resistencia que tienen diferentes tipos de bacterias. Esto se ha observado en algunos estudios, como el realizado por Wuytack *et al.* (2003), donde se obtuvo una reducción de 10^6 CFU/g de *S. Typhiurium*, *E. coli* MG1655 y *Listeria innocua* con un tratamiento de 300 MPa por 15 minutos, a 4 °C, en semillas de berro. Por su parte, para *Shigella flexneri* y *E. coli* LMM1010—cepas resistentes a las presiones— se logró una reducción de 10^4 CFU/g. La menor reducción lograda con estas condiciones se obtuvo en *Staphylococcus aureus* con tan solo 10^2 UFC/g (Wuytack *et al.*, 2003).

La aplicación de PLAI en semillas de alfalfa demostró que *Listeria monocytogenes* es más resistente que *E. coli* O157:H7 a las altas presiones (Ariefdjohan *et al.*, 2006). Mientras que otros estudios comprobaron que un tratamiento en semillas de alfalfa de 650 MPa y 20 °C por 15 minutos, tiene el mismo efecto que uno con 550 MPa, a 40 °C por 2 minutos, para inactivar *E. coli* O157:H7 (Neetoo *et al.*, 2008; Neetoo *et al.*, 2009). Igual-

mente, en alfalfa se demostró que remojar previamente las semillas mejora la inactivación de *E. coli* O157:H7 y de *Salmonella* spp., pero disminuye la viabilidad para germinar en las semillas de alfalfa (Neetoo y Chen, 2010).

4.4. Dióxido de carbono supercrítico (sc-co₂)

El efecto bactericida del dióxido de carbono supercrítico (sc-co₂) se debe probablemente a la reducción del pH intracelular, provocando la inactivación de enzimas claves para el metabolismo de la célula, disruptión bacteriana y un incremento en la presión interna de la célula, modificaciones en la membrana celular, y la extracción de sustancias intracelulares (Spilimbergo y Bertucco, 2003).

Los estudios que han observado la aplicación de esta tecnología a semillas para germinados reportan mejores resultados con mayores presiones de sc-co₂, temperatura o tiempo de tratamiento. Mazzoni *et al.* (2001) lograron reducciones del 92.8% (>104 UFC/g) de *E. coli* K12 inoculada en semillas de alfalfa, utilizando SC-CO₂ a 4000 psi y 50 °C por 60 minutos, sin afectar las características de germinación de las semillas. El mismo estudio confirmó que un tratamiento con dicha presión y temperatura, por solo 15 minutos, la inhibición fue mayor al 50%, por lo que la duración es un factor importante a considerar. De igual manera, se obtiene una reducción de 3.51 ciclos logarítmicos de *E. coli* O157:H7 con un tratamiento a 15 MPa y 35 °C por 10 minutos, mientras que para lograr reducciones cercanas a 10^3 UFC/g en colonias de *L. monocytogenes* y *S. Typhimurium* fue necesario un tratamiento a 10 MPa a 45 °C por 5 minutos. Por su parte, se logró una reducción de más de 10^7 UFC/g de estos tres patógenos con un tratamiento a 20 MPa y 45 °C por 15 minutos; sin embargo, bajo estas condiciones la capacidad de germinación disminuyó (Jung *et al.*, 2009).

Los estudios disponibles muestran que el tratamiento con sc-co₂ por sí solo no es capaz de alcanzar una reducción igual o mayor a 10^5 UFC/g de patógenos en las semillas utilizadas, por lo que no cumple los estándares recomendados por el Comité Consultivo Nacional sobre Criterios Microbiológicos para Alimentos (NACMCF, por sus siglas en inglés) (Yang *et al.*, 2013).

4.5. Radiaciones ionizantes

Las radiaciones ionizantes son tecnologías no térmicas con efectividad comprobada para mejorar la inocuidad de los alimentos, extendiendo su vida de anaquel (Song *et al.*, 2009). Estas incluyen a los rayos gamma producidos por fuentes de cobalto 60 o cesio 137, electrones generados por máquinas como el «e-beam» (haz de electrones) y los rayos X (Komolprasert, 2007). A pesar de diversas controversias, la FDA ha aprobado su uso para el tratamiento de semillas con una dosis máxima de 8 kGy (Yang *et al.*, 2013).

Rajkowski *et al.* (2003) reportaron la inactivación total de *Salmonella* en germinados de alfalfa procedentes de semillas tratadas con radiación gama y dosis iguales o mayores a 0.5 kGy. Pero esta tecnología ha sido investigada en su aplicación no solo a semillas, sino también al producto ya germinado. Schoeller *et al.* (2002) realizaron un estudio en germinado de alfalfa, donde obtuvieron reducciones superiores a 10^6 CFU/g de *Listeria monocytogenes* con dosis de 3.3 kGy de radiación beta. Los resultados mostraron que dichos tratamientos no generaron cambios en apariencia u olor del alimento. Por su parte, Bari *et al.* (2005) observaron reducciones de 4.88 y 4.57 ciclos logarítmicos en germinados de brócoli y frijol, respectivamente, tras un tratamiento con 1 kGy.

De igual manera, se ha estudiado la aplicación de esta tecnología en combinación con otras. Bari, Nei *et al.* (2009) utilizaron la radiación en combinación con un tratamiento térmico para suprimir el crecimiento de *E. coli* O157:H7 en frijol mungo (tabla II). Cabe mencionar que dicha reducción no fue alcanzada por el tratamiento térmico o por la irradiación por sí solas cuando se probaron por separado.

La principal ventaja de la aplicación de radiación en germinados, aparte de la efectividad en la inactivación de patógenos, es la extensión de la vida útil de estos alimentos debido a la disminución, en general, de microorganismos deteriorativos. Estudios de vida de anaquel en germinados de alfalfa y de brócoli han demostrado que esta extensión puede ser de hasta 10 días utilizando una dosis baja de 2 kGy. Sin embargo, es en su aplicación en la semilla donde se encuentra la principal des-

ventaja, ya que se ha observado que dosis altas de radiación tienen efectos adversos en el porcentaje de germinación, la tasa de rendimiento, así como en la morfología (largo y ancho) del germinado (Rajkowski *et al.*, 2003).

Por otro lado, la aplicación de dosis bajas de radiación (menores a 3 kGy) no altera las características del germinado, ni tiene algún efecto significativo en su germinación. Sin embargo, estas dosis no garantizan la inocuidad del producto germinado. Estudios realizados sobre el efecto de dosis bajas (1 kGy) en semilla de frijol mungo inoculado con *E. coli* y *Salmonella Typhimurium* mostraron una reducción de 2.6 ciclos log UFC/g en la semilla, pero esta población alcanzó un recuento de hasta 10^8 UFC/g tras 48 horas de germinación de las semillas previamente tratadas (Saroj *et al.*, 2007).

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Las semillas y sus germinados son productos naturales con muchos beneficios nutricionales y asociados a la salud; sin embargo, su naturaleza los hace proclives a la contaminación con microorganismos patógenos. En atención al elevado riesgo que ello implica, se han emitido varias recomendaciones con el objetivo de mitigar las causas de posibles enfermedades transmitidas por alimentos. Estas recomendaciones se han orientado principalmente hacia la implementación de buenas prácticas de agricultura y manufactura durante su producción, en el caso de las semillas de consumo directo. Para las semillas para germinados, la FDA recomienda su sanitización con una solución con 20,000 ppm de hipoclorito de calcio; no obstante, esta práctica tiene una alta variabilidad y limitada eficacia. Así lo respalda el hecho de que, a pesar de su existencia, cada año se reportan enfermedades transmitidas por alimentos, y producidas por patógenos como *E. coli*, *Salmonella* spp y *Listeria monocytogenes* en estos productos.

Dado que los métodos químicos presentan limitaciones debido, por un lado, a su inutilidad para alcanzar las bacterias escondidas en superficies rugosas de las semillas y, por otro, a que por sus características no pueden ser aplicados en el grupo de semillas de consumo directo, ya que alteran sus propiedades sensoriales, se han buscado otro tipo de tecnologías. Entre las investigadas, los mejores resultados aplicando un solo tipo de tecnología se han obtenido con métodos físicos, especialmente los tratamientos con altas presiones, irradiación y tratamientos térmicos con calor seco a temperaturas cercanas a los 50 °C y prolongados períodos de tiempo. Sin embargo, también hay que considerar que dichos tratamientos no afecten la calidad nutricional de las semillas, ni su capacidad para germinar cuando se trate de semillas para germinados. Tal es el caso de la irradiación de semillas; si bien se ha comprobado su alta efectividad de inactivación microbiana, afecta el crecimiento del brote del germinado en dosis elevadas.

Los mejores resultados obtenidos, considerando la reducción e inactivación total de los patógenos en semillas, ha sido la combinación de dos o más tecnologías, como el tratamiento térmico con posterior irradiación o tratamientos con ozono seguido de irradiación a dosis muy bajas que no afecten la tasa de germinación de las semillas. Estos resultados apuntan a que una posible alternativa a las 20,000 ppm de cloro recomendadas por la FDA se encuentre en el diseño y aplicación de alguna de estas combinaciones de tecnologías para lograr asegurar la inocuidad de estos productos.

AGRADECIMIENTOS

La autora del presente artículo 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 otorgado para sus estudios en el Doctorado en Ciencia de Alimentos de la UDLAP.

REFERENCIAS

- Ariefdjohan, M. W., Nelson, P. E., Singh, R. K., Bhunia, A. K., Balasubramanian, V. M., y Singh, N. (2006). Efficacy of high hydrostatic pressure treatment in reducing *Escherichia coli* O157 and *Listeria monocytogenes* in alfalfa seeds. *Journal of Food Science*, 69(5), M117-M120. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.tb10718.x>
- Bang, J., Kim, H., Kim, H., Beuchat, L. R. y Ryu, J.-H. (2011). Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 on radish seeds by sequential treatments with chlorine dioxide, drying, and dry heat without loss of seed viability. *Applied and Environmental Microbiology*, 77(18), 6680-6686. <https://doi.org/10.1128/AEM.05715-11>
- Bari, M. L., Enomoto, K., Nei, D., y Kawamoto, S. (2010). Scale-Up seed decontamination process to inactivate *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella enteritidis* on mung bean seeds. *Foodborne Pathogens and Disease*, 7(1), 51-56. <https://doi.org/10.1089/fpd.2009.0389>
- Bari, M. L., Inatsu, Y., Isobe, S., y Kawamoto, S. (2008). Hot Water treatments to inactivate *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* in mung bean seeds. *Journal of Food Protection*, 71(4), 830-834. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-71.4.830>
- Bari, M. L., Nakauma, M., Todoriki, S., Juneja, V. K., Isshiki, K., & Kawamoto, S. (2005). Effectiveness of irradiation treatments in inactivating *Listeria monocytogenes* on fresh vegetables at refrigeration temperature. *Journal of Food Protection*, 68(2), 318-323. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-68.2.318>
- Bari, M. L., Nei, D., Enomoto, K., Todoriki, S. y Kawamoto, S. (2009). Combination treatments for killing *Escherichia coli* O157:H7 on alfalfa, radish, broccoli, and mung bean seeds. *Journal of Food Protection*, 72(3), 631-636. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-72.3.631>
- Bari, M. L., Sugiyama, J., y Kawamoto, S. (2009). Repeated quick hot-and-chilling treatments for the inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 in mung bean and radish seeds. *Foodborne Pathogens and Disease*, 6(1), 137-143. <https://doi.org/10.1089/fpd.2008.0143>
- Bellostas, N., Kachlicki, P., Sørensen, J. C. y Sørensen, H. (2007). Glucosinolate profiling of seeds and sprouts of *B. oleracea* varieties used for food. *Scientia Horticulturae*, 114(4), 234-242. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.06.015>
- Burt, S. (2004). Essential oils: Their antibacterial properties and potential applications in foods. *International Journal of Food Microbiology*, 94(3), 223-253. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.03.022>

- CDC (Centers for Disease Control and Prevention Foodborne Outbreak). Online Database. 2020. Disponible en: <http://www.cdc.gov/foodborneoutbreaks/Default.aspx> Consultado en febrero 2020.
- Chang, S., Redondo-Solano, M. y Thippareddi, H. (2010). Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* spp. On alfalfa seeds by caprylic acid and monocaprylin. *International Journal of Food Microbiology*, 144(1), 141-146. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2010.09.011>
- Demirci, A. y Keklik, N. M. (2012). Process design involving pulsed uv light. En J. Ahmed y M. S. Rahman (ed.), *Handbook of food process desing* (pp. 1166-1239). Wiley-Blackwell.
- Ding, H., Fu, T.-J. y Smith, M. A. (2013). Microbial contamination in sprouts: How effective is seed disinfection treatment?: seed disinfection for sprouts. *Journal of Food Science*, 78(4), R495-R501. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12064>
- ECDC (European Center for Disease Prevention and Control). Online Database. 2020. Disponible en: <https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data?search=food+outbreaks>. Consultado en febrero 2020.
- Feng, G., Churey, J. J. y Worobo, R. W. (2007). Thermal inactivation of *Salmonella* and *Escherichia coli* O157:H7 on alfalfa seeds. *Journal of Food Protection*, 70(7), 1698-1703. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-70.7.1698>
- Fernández Molina, J. J., Barbosa-Cánovas, G. V. y Swanson, B. G. (2001). Tecnologías emergentes para la conservación de alimentos sin calor. *Arbor*, 168(661), 155-170. <https://doi.org/10.3989/arbor.2001.i661.827>
- Fransisca, L., Zhou, B., Park, H. y Feng, H. (2011). The effect of calcinated calcium and chlorine treatments on *Escherichia coli* O157:H7 87-23 population reduction in radish sprouts. *Journal of Food Science*, 76(6), M404-M412. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02270.x>
- Gandhi, M. y Matthews, K. R. (2003). Efficacy of chlorine and calcinated calcium treatment of alfalfa seeds and sprouts to eliminate *Salmonella*. *International Journal of Food Microbiology*, 87(3), 301-306. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(03\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(03)00108-9)
- Gómez-López, V. M., Ragaert, P., Debevere, J. y Devlieghere, F. (2007). Pulsed light for food decontamination: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 18(9), 464-473. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2007.03.010>
- Harvey, R. R., Zakhour, C. M. y Gould, L. H. (2016). Foodborne disease outbreaks associated with organic foods in the United States. *Journal of Food Protection*, 79(11), 1953-1958. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-16-204>
- Himathongkham, S., Nuanualsuwan, S., Riemann, H. y Cliver, D. O. (2001). Reduction of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella Typhimurium* in artificially contaminated alfalfa seeds and mung beans by fumigation with ammonia. *Journal of Food Protection*, 64(11), 1817-1819. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-64.11.1817>
- Hu, H., Churey, J. J. y Worobo, R. W. (2004). Heat treatments to enhance the safety of mung bean seeds. *Journal of Food Protection*, 67(6), 1257-1260. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-67.6.1257>
- Hwang, H.-J., Cheigh, C.-I. y Chung, M.-S. (2017). Construction of a pilot-scale continuous-flow intense pulsed light system and its efficacy in sterilizing sesame seeds. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 39, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.10.017>
- Jung, W. Y., Choi, Y. M. y Rhee, M. S. (2009). Potential use of supercritical carbon dioxide to decontaminate *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes*, and *Salmonella Typhimurium* in alfalfa sprouted seeds. *International Journal of Food Microbiology*, 136(1), 66-70. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2009.08.014>
- Kim, S.-M., Hwang, H.-J., Cheigh, C.-I. y Chung, M.-S. (2019). Bactericidal effect of intense pulsed light on seeds without loss of viability. *Food Science and Biotechnology*, 28(1), 281-287. <https://doi.org/10.1007/s10068-018-0456-4>
- Komolprasert, V. (2007). Packaging for foods treated by ionizing radiation. En J. H. Han (ed.) *Packaging for nonthermal processing of food* (pp. 87-116). Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9780470277720.ch6>
- Kotan, R., Dadasoğlu, F., Karagoz, K., Cakir, A., Ozer, H., Kordali, S., Cakmakci, R. y Dikbas, N. (2013). Antibacterial activity of the essential oil and extracts of *Satureja hortensis* against plant pathogenic bacteria and their potential use as seed disinfectants. *Scientia Horticulturae*, 153, 34-41. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.01.027>
- Kumar, M., Hora, R., Kostrzynska, M., Waites, W. M. y Warriner, K. (2006). Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* on mung beans, alfalfa,

- and other seed types destined for sprout production by using an oxychloro-based sanitizer. *Journal of Food Protection*, 69(7), 1571-1578. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-69.7.1571>
- Landry, K. S., Komaiko, J., Wong, D. E., Xu, T., McClements, D. J. y McLandsborough, L. (2016). Inactivation of *Salmonella* on sprouting seeds using a spontaneous carvacrol nanoemulsion acidified with organic acids. *Journal of Food Protection*, 79(7), 1115-1126. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-15-397>
- Lang, M. M., Ingham, B. H. y Ingham, S. C. (2000). Efficacy of novel organic acid and hypochlorite treatments for eliminating *Escherichia coli* O157:H7 from alfalfa seeds prior to sprouting. *International Journal of Food Microbiology*, 58(1-2), 73-82. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(00\)00297-X](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(00)00297-X)
- Lee, G., Kim, Y., Kim, H., Beuchat, L. R. y Ryu, J.H. (2018). Antimicrobial activities of gaseous essential oils against *Listeria monocytogenes* on a laboratory medium and radish sprouts. *International Journal of Food Microbiology*, 265, 49-54. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.11.001>
- Len, S.V., Hung, Y.C., Chung, D., Anderson, J. L., Erickson, M. C. y Morita, K. (2002). Effects of storage conditions and pH on chlorine loss in electrolyzed oxidizing (EO) water. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(1), 209-212. <https://doi.org/10.1021/jf010822v>
- Liu, R. y Yu, Z.-L. (2017). Application of electrolyzed water on reducing the microbial populations on commercial mung bean sprouts. *Journal of Food Science and Technology*, 54(4), 995-1001. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2445-2>
- Lorenzo-Leal, A. C., Palou, E. y López-Malo, A. (2019). Evaluation of the efficiency of allspice, thyme and rosemary essential oils on two foodborne pathogens in in-vitro and on alfalfa seeds, and their effect on sensory characteristics of the sprouts. *International Journal of Food Microbiology*, 295, 19-24. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2019.02.008>
- Loui, C., Grigoryan, G., Huang, H., Riley, L. W. y Lu, S. (2008). Bacterial communities associated with retail alfalfa sprouts. *Journal of Food Protection*, 71(1), 200-204. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-71.1.200>
- Martínez-Villaluenga, C., Frías, J., Gulewicz, P., Gulewicz, K. y Vidal-Valverde, C. (2008). Food safety evaluation of broccoli and radish sprouts. *Food and Chemical Toxicology*, 46(5), 1635-1644. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2008.01.004>
- Mazzoni, A. M., Sharma, R. R., Demirci, A. y Ziegler, G. R. (2001). Supercritical carbon dioxide treatment to inactivate aerobic microorganisms on alfalfa seeds. *Journal of Food Safety*, 21(4), 215-223. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4565.2001.tb00320.x>
- Neetoo, H. y Chen, H. (2010). Pre-soaking of seeds enhances pressure inactivation of *E. coli* O157:H7 and *Salmonella* spp. on crimson clover, red clover, radish and broccoli seeds. *International Journal of Food Microbiology*, 137(2-3), 274-280. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2009.11.026>
- Neetoo, H., Pizzolato, T. y Chen, H. (2009). Elimination of *Escherichia coli* O157:H7 from alfalfa seeds through a combination of high hydrostatic pressure and mild heat. *Applied and Environmental Microbiology*, 75(7), 1901-1907. <https://doi.org/10.1128/AEM.02531-08>
- Neetoo, H., Ye, M. y Chen, H. (2008). Potential application of high hydrostatic pressure to eliminate *Escherichia coli* O157:H7 on alfalfa sprouted seeds. *International Journal of Food Microbiology*, 128(2), 348-353. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2008.09.011>
- Nei, D., Latiful, B. M., Enomoto, K., Inatsu, Y. y Kawamoto, S. (2011). Disinfection of radish and alfalfa seeds inoculated with *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* by a gaseous acetic acid treatment. *Foodborne Pathogens and Disease*, 8(10), 1089-1094. <https://doi.org/10.1089/fpd.2011.0901>
- O'Neill, C. J., Bolton, D. J. y Fanning, S. (2011). Comparative studies on the survival of verocytotoxigenic *Escherichia coli* and *Salmonella* in different farm environments. *Agriculture, Food and Analytical Bacteriology*, 1, 116-122.
- Pao, S., Kalantari, A. y Khalid, M. F. (2008). Eliminating salmonella enterica in alfalfa and mung bean sprouts by organic acid and hot water immersions. *Journal of Food Processing and Preservation*, 32(2), 335-342. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2008.00182.x>
- Rajkowski, K. T. y Ashurst, K. (2009). Use of 1% peroxyacetic acid sanitizer in an air-mixing wash basin to remove bacterial pathogens from seeds. *Foodborne Pathogens and Disease*, 6(9), 1041-1046. <https://doi.org/10.1089/fpd.2009.0267>
- Rajkowski, K. T., Boyd, G. y Thayer, D. W. (2003). Irradiation d-values for *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* sp. on inoculated broccoli seeds and effects of

- irradiation on broccoli sprout keeping quality and seed viability. *Journal of Food Protection*, 66(5), 760-766. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-66.5.760>
- Rendueles, E., Omer, M. K., Alvseike, O., Alonso-Calleja, C., Capita, R., y Prieto, M. (2011). Microbiological food safety assessment of high hydrostatic pressure processing: a review. *LWT - Food Science and Technology*, 44(5), 1251-1260. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.11.001>
- Reyes-Jurado, F., Navarro-Cruz, A. R., Méndez-Aguilar, J., Ochoa-Velasco, C. E., Mani-López, E., Jiménez-Munguía, M. T., Palou, E., López-Malo, A. y Ávila-Sosa, R. (2019). High-intensity light pulses to inactivate *Salmonella Typhimurium* on Mexican chia (*Salvia hispanica L.*) seeds. *Journal of Food Protection*, 82(8), 1272-1277. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-18-577>
- Rosenquist, H., Smidt, L., Andersen, S. R., Jensen, G. B. y Wilcks, A. (2005). Occurrence and significance of *Bacillus cereus* and *Bacillus thuringiensis* in ready-to-eat food. *FEMS Microbiology Letters*, 250(1), 129-136. <https://doi.org/10.1016/j.femsle.2005.06.054>
- Rowan, N. J. (2019). Pulsed light as an emerging technology to cause disruption for food and adjacent industries - Quo vadis? *Trends in Food Science & Technology*, 88, 316-332. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.03.027>
- Saroj, S. D., Hajare, S., Shashidhar, R., Dhokane, V., Sharma, A. y Bandekar, J. R. (2007). Radiation processing for elimination of *Salmonella Typhimurium* from inoculated seeds used for sprout making in india and effect of irradiation on germination of seeds. *Journal of Food Protection*, 70(8), 1961-1965. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-70.8.1961>
- Schoeller, N. P., Ingham, S. C. y Ingham, B. H. (2002). Assessment of the potential for listeria monocytogenes survival and growth during alfalfa sprout production and use of ionizing radiation as a potential intervention treatment. *Journal of Food Protection*, 65(8), 1259-1266. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-65.8.1259>
- Seo, H.-S., Beuchat, L. R., Kim, H. y Ryu, J.H. (2015). Development of an experimental apparatus and protocol for determining antimicrobial activities of gaseous plant essential oils. *International Journal of Food Microbiology*, 215, 95-100. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2015.08.021>
- Sharma, R.R., y Demirci, A. (2003). Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 on inoculated alfalfa seeds with pulsed ultraviolet light and response surface modeling. *Journal of Food Science*, 68(4), 1448-1453. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2003.tb09665.x>
- Sharma, R. R., Demirci, A., Beuchat, L. R. y Fett, W. F. (2002). Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 on inoculated alfalfa seeds with ozonated water and heat treatment. *Journal of Food Protection*, 65(3), 447-451. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-65.3.447>
- Singh, B. R., Chandra, M., Agarwal, R. y Babu, N. (2005). Curing of salmonella enterica, serovar typhimurium-contaminated cowpea seeds and sprouts with vinegar and chlorination. *Journal of Food Processing and Preservation*, 29(3-4), 268-277. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2005.00027.x>
- Singh, N., Singh, R. K. y Bhunia, A. K. (2003). Sequential disinfection of *Escherichia coli* O157:H7 inoculated alfalfa seeds before and during sprouting using aqueous chlorine dioxide, ozonated water, and thyme essential oil. *LWT - Food Science and Technology*, 36(2), 235-243. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(02\)00224-4](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(02)00224-4)
- Singla, R., Ganguli, A. y Ghosh, M. (2011). An effective combined treatment using malic acid and ozone inhibits *Shigella* spp. On sprouts. *Food Control*, 22(7), 1032-1039. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2010.12.012>
- Song, H. P., Kim, B., Jung, S., Choe, J. H., Yun, H., Kim, Y. J. y Jo, C. (2009). Effect of gamma and electron beam irradiation on the survival of pathogens inoculated into salted, seasoned, and fermented oyster. *LWT - Food Science and Technology*, 42(8), 1320-1324. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.03.018>
- Song, K. Y., Joung, K. Y., Shin, S. Y. y Kim, Y. S. (2018). Effects of chia (*salvia hispanica l.*) Seed roasting conditions on quality of cookies. *Italian Journal of Food Science*, 31(1). <https://doi.org/10.14674/IJFS-1198>
- Spilimbergo, S. y Bertucco, A. (2003). Non-thermal bacterial inactivation with dense CO₂. *Biotechnology and Bioengineering*, 84(6), 627-638. <https://doi.org/10.1002/bit.10783>
- Tamber, S., Swist, E. y Oudit, D. (2016). Physicochemical and bacteriological characteristics of organic sprouted chia and flax seed powders implicated

- in a foodborne salmonellosis outbreak. *Journal of Food Protection*, 79(5), 703-709. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-15-529>
- Thomas, J. L., Palumbo, M. S., Farrar, J. A., Farver, T. B. y Cliver, D. O. (2003). Industry practices and compliance with U.S. Food and Drug Administration guidelines among California sprout firms. *Journal of Food Protection*, 66(7), 1253-1259. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-66.7.1253>
- Tornuk, F., Ozturk, I., Sagdic, O. y Yetim, H. (2011). Determination and improvement of microbial safety of wheat sprouts with chemical sanitizers. *Foodborne Pathogens and Disease*, 8(4), 503-508. <https://doi.org/10.1089/fpd.2010.0709>
- Tyagi, A. K., Malik, A., Gottardi, D. y Guerzoni, M. E. (2012). Essential oil vapour and negative air ions: A novel tool for food preservation. *Trends in Food Science & Technology*, 26(2), 99-113. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.02.004>
- Weiss, A., Hertel, C., Grothe, S., Ha, D. y Hammes, W. P. (2007). Characterization of the cultivable microbiota of sprouts and their potential for application as protective cultures. *Systematic and Applied Microbiology*, 30(6), 483-493. <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2007.03.006>
- Willis, C., Little, C. L., Sagoo, S., de Pinna, E. y Threlfall, J. (2009). Assessment of the microbiological safety of edible dried seeds from retail premises in the United Kingdom with a focus on *Salmonella* spp. *Food Microbiology*, 26(8), 847-852. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2009.05.007>
- Wuytack, E. Y., Diels, A. M. J., Meersseman, K. y Michiels, C. W. (2003). Decontamination of seeds for seed sprout production by high hydrostatic pressure. *Journal of Food Protection*, 66(6), 918-923. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-66.6.918>
- Yang, Y., Meier, F., Ann Lo, J., Yuan, W., Lee Pei Sze, V., Chung, H. J. y Yuk, H.-G. (2013). Overview of recent events in the microbiological safety of sprouts and new intervention technologies: sprout safety and control. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 12(3), 265-280. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12010>
- Zhang, C., Lu, Z., Li, Y., Shang, Y., Zhang, G. y Cao, W. (2011). Reduction of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella enteritidis* on mung bean seeds and sprouts by slightly acidic electrolyzed water. *Food Control*, 22(5), 792-796. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2010.11.018>

UDLAP[®]

Departamento de Ingeniería Química,
Alimentos y Ambiental