

tsia

TEMAS SELECTOS DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS



TSIA

Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos

UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS PUEBLA

EDITORA EN JEFE

María Teresa Jiménez Munguía

CONSEJO EDITORIAL

Volumen 17 - 2023

Mónica Dávila Rodríguez

Gabriel A. Cardoso Ugarte

Paola Hernández Carranza

Emma Mani López

Jocksan Morales Camacho

Nohemí Soto Reyes

DISEÑO EDITORIAL

Angélica Cabañas Ramírez

CORRECCIÓN DE ESTILO

Andrea Garza Carbajal

Román Esaú Ocotitla Huerta

Beatriz Ramírez Berttolini

TSIA año 17, volumen 17 (2023) es una publicación anual de la Universidad de las Américas Puebla, realizada y distribuida por el Departamento de Ingeniería Química y Alimentos. Ex hacienda Sta. Catarina Mártir s/n, San Andrés Cholula, Puebla, C. P. 72810. Teléfono: (222) 229 2126, www.udlap.mx, mariat.jimenez@udlap.mx. Editora responsable: María Teresa Jiménez Munguía. Responsable de la última actualización de este número: Servicios Web y Administración de Contenidos. Ex hacienda Santa Catarina Mártir s/n, San Andrés Cholula, Puebla, C. P. 72810. Fecha de la última modificación: 25 de febrero de 2026.

UDLAP®



CONTENIDOS

VOL. 17

07. **Carta editorial**
Volumen 17
-
08. **Bebidas fermentadas elaboradas a partir de semillas no convencionales: producción, características y propiedades**
S. S. Reyes-Flores y M. M. Ramírez-Rodrigues
-
24. **Proteínas de leguminosas modificadas químicamente: estructura, funcionalidad y su aplicación en alimentos**
L. Rosas-Ordoñez y D. K. Baigts-Allende
-
40. **El uso de filtros en el procesamiento de bebidas: actualidad y nuevos retos**
R. Hernández-López y N. Ramírez- Corona
-





Carta editorial

VOL. 17

La escritura científica es un ejercicio que exige tiempo, disciplina y constancia. Redactar con claridad, sustentar con rigor y sintetizar información relevante son habilidades que se construyen con la práctica continua. De igual manera, la divulgación del conocimiento no debe entenderse como una actividad secundaria, sino como una responsabilidad inherente a la labor del investigador. Comunicar la ciencia con precisión y sentido crítico fortalece tanto al autor como a la comunidad académica.

La revista Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos (TSIA) constituye un espacio formativo invaluable para los estudiantes del Doctorado en Ciencia de Alimentos de la Universidad de las Américas Puebla. A través de la elaboración de artículos de revisión, los investigadores en formación desarrollan competencias de análisis, integración de información y comunicación escrita, al tiempo que se familiarizan con procesos formales de evaluación académica. Este ejercicio temprano de publicación contribuye de manera significativa a su preparación profesional y científica.

En el volumen 17 se presentan artículos que abordan temas de actualidad en el área de ciencia y tecnología de alimentos. El primero analiza la producción, características y propiedades de las bebidas fermentadas elaboradas a partir de semillas no convencionales; el segundo revisa la estructura, funcionalidad y aplicaciones de proteínas de leguminosas modificadas químicamente; y el tercero examina el uso de filtros en el procesamiento de bebidas, destacando los avances recientes y los retos tecnológicos asociados. Estas contribuciones ofrecen al lector una visión actualizada de tópicos relevantes que impactan el desarrollo de nuevos productos y procesos en la industria alimentaria.

Agradecemos a la Universidad de las Américas Puebla, así como a los profesores, investigadores y al cuerpo editorial del Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, por mantener y fortalecer este canal de difusión académica. Estoy convencido de que iniciativas como TSIA continúan promoviendo en nuestros estudiantes el compromiso con la escritura científica rigurosa y la generación de conocimiento que aporte soluciones innovadoras a los desafíos del sector alimentario.

Que este volumen motive la reflexión crítica y estimule nuevas preguntas que impulsen el avance de la ciencia de los alimentos.

Dr. Aarón Romo Hernández

Director académico del Departamento de
Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental
Universidad de las Américas Puebla



Bebidas fermentadas elaboradas a partir de semillas no convencionales:

producción, características y propiedades

S. S. Reyes-Flores* y M. M. Ramírez-Rodrigues

*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos
Correo electrónico: samanta.reyesfs@udlap.mx

RESUMEN

En los últimos años, se ha observado un mayor uso de semillas no convencionales en la elaboración de bebidas fermentadas debido a sus propiedades nutricionales y funcionales. En la presente revisión se abordará el tema de las bebidas fermentadas elaboradas a partir de semillas no convencionales como la chía, la quinua, el amaranto y el cáñamo, con la finalidad de presentar sus características, propiedades y variables de proceso. Las semillas no convencionales presentadas son una opción para la elaboración de bebidas fermentadas, ya que traen consigo diferentes beneficios, como presentar probióticos y compuestos prebióticos, ofrecer un alto contenido de macronutrientes, micronutrientes y compuestos bioactivos, así como los consecuentes efectos benéficos en la salud tras su consumo.

Palabras clave: bebidas, fermentación, semillas no convencionales, quinua, amaranto, cáñamo, chía.

ABSTRACT

In recent years, there has been an increased use of non-conventional seeds in the production of fermented beverages due to their nutritional properties. This review will address the subject of fermented beverages made from non-conventional seeds such as chia, quinoa, amaranth, and hemp, with the aim to show their characteristics, properties, and process variables. The non-conventional seeds presented are a viable option for the elaboration of fermented beverages since they offer different benefits such as presenting probiotic microorganisms and prebiotic compounds, offering a high content of macronutrients, micronutrients, and bioactive compounds as well as the health benefits after their consumption.

Keywords: beverages, fermentation, unconventional seeds, quinoa, amaranth, hemp, chia.

INTRODUCCIÓN

Se conocen como bebidas fermentadas a aquellas que para su elaboración pasaron por algún proceso de fermentación, el cual aporta sabores, texturas y otros beneficios nutricionales exclusivos y propios de la bebida, tales como la presencia de distintos probióticos, compuestos prebióticos, aminoácidos, vitaminas y minerales, etc. Las bebidas fermentadas proporcionan efectos benéficos en la salud para el usuario que las consume; incluyendo efectos reductores de la glucosa en la sangre, efectos antitrombóticos y propiedades antidiarreicas. Estas propiedades se asocian con moléculas nutritivas bioactivas (nutrientes, vitaminas, minerales, fibras, etc.), así como con compuestos químicos no nutritivos (compuestos fenólicos, flavonoides, péptidos bioactivos, etc.) (Valero-Cases *et al.*, 2020).

Las bebidas fermentadas a partir de semillas se han consumido durante miles de años y en la actualidad están recibiendo más atención, principalmente debido a la presencia de compuestos bioactivos y al valor nutricional de las materias primas utilizadas para su producción. Si bien existen bebidas fermentadas a partir de semillas que tienen alta popularidad como el sake y la cerveza, se han reportado estudios donde se elaboran nuevas bebidas y jugos fermentados a base de cereales, legumbres y pseudocereales no convencionales (Grumezescu y Holban, 2019).

Aunque hoy en día se conocen los métodos y materias primas convencionales para la elaboración de ciertas bebidas, estos pueden llegar a modificarse con el fin de obtener nuevas características sensoriales, como diferentes perfiles de aroma y sabor. Recientemente se ha observado una mayor aplicación de semillas, como la quinua, la linaza, el sésamo y el cáñamo, en la elaboración de bebidas fermentadas debido a sus propiedades nutricionales. La adición y uso de estas semillas plantea ser una prometedora fuente para enriquecer el perfil de nutrientes y compuestos bioactivos en las bebidas fermentadas (Adebo, 2020; Bartkiene *et al.*, 2020; Ludena-Urquiza *et al.*, 2017; Narzary *et al.*, 2016; Valero-Cases *et al.*, 2020).

En la presente revisión se abordará el tema de bebidas fermentadas elaboradas a partir de semillas no convencionales (SNC) como la chía, la quinua, el amaranto y cáñamo, con la finalidad de presentar sus características, propiedades y variables de proceso.

1. Fermentación en bebidas alimentarias

La fermentación es un proceso usado para la obtención de productos y bebidas alimentarias. Desde un punto de vista tecnológico en el área de los alimentos, la fermentación es un proceso que involucra la aplicación de microorganismos específicos para transformar la materia orgánica contenida en una matriz alimentaria. Esta transformación de materia deriva en la formación de metabolitos secundarios que pueden ser ácidos orgánicos, alcoholes, dióxido de carbono y/u otros compuestos. Los procesos de fermentación de bebidas se pueden clasificar por los microorganismos involucrados o los metabolitos primarios resultantes. En el caso de microorganismos involucrados, los grupos más comunes en la fermentación de los alimentos son bacterias, levaduras y mohos. Por otra parte, según los metabolitos consecuentes, se clasifican en fermentaciones ácido láctica, alcohólica, ácido acética o mixta (Admassie, 2018; Gastineau, 2013; World Health Organization Food Safety, 1996).

Las principales funciones del proceso de fermentación son la conservación de los alimentos, la mejora del valor nutricional y la mejora de la calidad sensorial. Respecto a la conservación de alimentos, esta se le atribuye a la formación de metabolitos inhibitorios, como ácidos orgánicos (ácido acético, el ácido fórmico y el ácido propiónico), etanol, dióxido de carbono, diacetilo, reutrina, bacteriocinas, entre otros; así como a la eliminación de compuestos tóxicos (Admassie, 2018; Contreras y Del Campo, 2015; Erkmén y Bozoğlu, 2016; World Health Organization Food Safety, 1996).

Por otro lado, la calidad nutricional de los alimentos fermentados se complementa por la presencia de vitaminas, compuestos resultantes de la síntesis anabólica de los propios microorganismos fermentadores. También durante el proceso de fermentación ocurren rupturas de los revestimientos o paredes celulares en la matriz alimentaria, permitiendo la liberación de enzimas. Consecuentemente, la actividad enzimática induce a que estén disponibles nuevas moléculas nutritivas (conversión de fibras solubles a azúcares simples) (Admassie, 2018; Hasan *et al.*, 2014).

Además, el valor nutricional de los alimentos fermentados es comparable a otros alimentos debido a la presencia de probióticos como las bacterias ácido lácticas y bacterias del género *Bifidobacterium*, *Streptococcus*, *Saccharomyces*, *Enterococcus*, *Bacillus*, etc. Los probióticos son microorganismos vivos que se encuentran naturalmente en algunos alimentos fermentados

y que cuando se administran en cantidades adecuadas confieren beneficios al consumidor, incluyendo la prevención de infecciones, la reducción de los niveles de colesterol en sangre, la regulación cariogénica en la cavidad bucal, la modulación del sistema inmunario, la modulación de la respuesta inflamatoria a patógenos, la mejora de los procesos de digestión, así como el mantenimiento y equilibrio de la microflora intestinal (FAO *et al.*, 2006; Nissen *et al.*, 2020). Por otra parte, los prebióticos son componentes no vivos y no digeribles de los alimentos que confieren un beneficio en la salud del huésped, asociado con la modulación de la microbiota (Nissen *et al.*, 2020; Tripathi y Giri, 2014).

En el caso particular de la elaboración de bebidas fermentadas, los procesos de fermentación más relevantes son la alcohólica, la ácido láctica y la mixta. La fermentación alcohólica es un proceso anaeróbico en el cual comúnmente intervienen levaduras y/o mohos de los grupos *Saccharomyces*, *Schizosaccharomyces* o *Aspergillus* (figura 1); estos microorganismos transforman los azúcares presentes en algunos alimentos en alcohol, dióxido de carbono y energía. De otro modo, la fermentación ácido

láctica es un proceso anaeróbico en el cual comúnmente intervienen bacterias de los grupos *Lactobacillus*, *Enterococcus*, *Pediococcus*, *Streptococcus* o *Leuconostoc* (figura 2) (Bianchi *et al.*, 2017; Ludena Urquiza *et al.*, 2017). Estos microorganismos son protagonistas cruciales para la conservación y producción de algunas bebidas fermentadas a base de vegetales, plantas y semillas, así como bebidas fermentadas análogas a las bebidas lácteas. No obstante, la mayoría de los procesos de fermentación en alimentos y bebidas corresponden a una fermentación mixta, ya que dependen de la combinación de microorganismos que actúan en conjunto y producen las características deseadas (Admassie, 2018; Contreras y Del Campo, 2015; Grumezescu y Holban, 2019; Steinkraus, 1992; Zhao *et al.*, 2019).

En la actualidad existen diversas bebidas obtenidas a partir de la fermentación, por lo que para esta revisión se presenta una propuesta de clasificación de acuerdo con la matriz alimentaria empleada para el proceso de fermentación, haciendo hincapié en investigaciones recientemente publicadas sobre bebidas fermentadas a base de semillas.

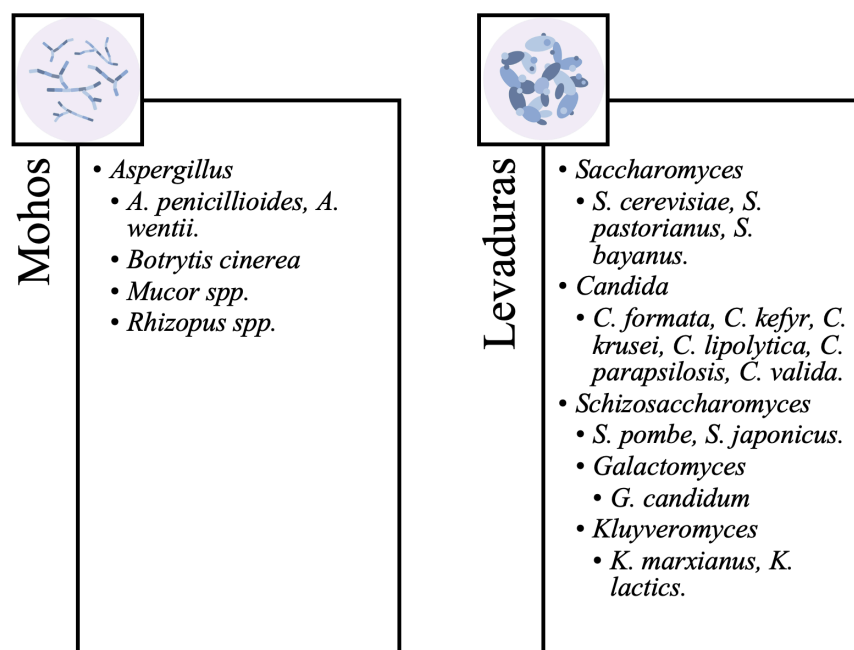


Figura 1.

Principales mohos y levaduras involucradas en la fermentación alcohólica aplicada en bebidas.

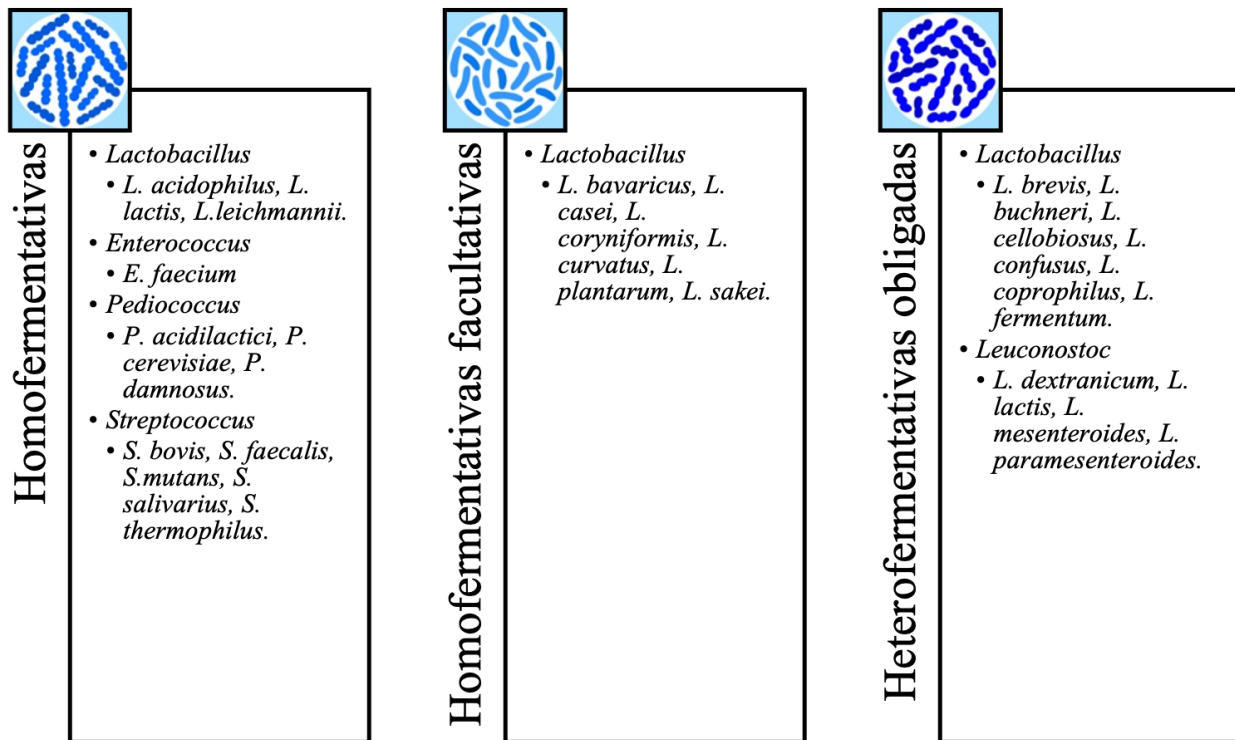


Figura 2.

Principales bacterias involucradas en la fermentación ácido láctica aplicada en bebidas. Adaptada de Hui *et al.* (2004); Ray y Joshi (2014).

1.1. Tipos de semillas utilizadas

Las semillas son una parte importante de los recursos de origen vegetal que se aplican para la elaboración de bebidas y alimentos, debido a su importante contenido nutricional como fuente de carbohidratos, proteínas, fibra, minerales y vitaminas. Las semillas se pueden clasificar comúnmente como cereales, legumbres, frutos secos y especias. Los cereales y las legumbres pertenecen a las familias botánicas *Poaceae* y *Fabaceae*, respectivamente; mientras que las nueces, pseudocereales y otras semillas forman grupos diversos en función de sus características particulares (Deshpande y Nations, 2000; Huq *et al.*, 1988; Lima *et al.*, 2021).

Algunas semillas convencionales como cereales (avena, arroz, maíz, cebada, trigo) y legumbres (soya, frijol, cacahuate, garbanzo) han sido ampliamente estudiadas y constituyen una parte importante de la materia prima para la elaboración de bebidas fermentadas; sin embargo, falta más investigación por hacer respecto a las bebidas fermentadas que se puedan elaborar con semillas pseudocereales tales como la chía, la quinua, el amaranto y el cáñamo. A estas últimas semillas se les referirá como semillas no convencionales (SNC), ya que no suelen ser utilizadas para la elaboración de diferentes tipos de alimentos (Bhardwaj *et al.*, 2020; Huq *et al.*, 1988; Sabikhi y Sathish Kumar, 2012).

En la última década, se ha observado un mayor uso de SNC (chía, cáñamo, sorgo, sésamo, acacia blanca, linaza, amaranto, etc.) en la industria alimenticia, ya que han demostrado brindar macronutrientes y micronutrientes con alto valor nutritivo, así como compuestos bioactivos, como los fenólicos. Así pues, a las SNC se les considera como una parte decisiva del grupo de las semillas para desarrollar productos innovadores con valor agregado, puesto que ofrecen al consumidor beneficios para la salud y/o alternativas nutricionales orientadas a satisfacer distintas preferencias y necesidades (Adebo, 2020; Lopes *et al.*, 2019; Ludena Urquiza *et al.*, 2017; Narzary *et al.*, 2016; Szparaga *et al.*, 2019; Valero-Cases *et al.*, 2020).

1.2. Tipos de fermentación

Los procesos reportados de fermentación (tabla I) que prevalecen para la elaboración de bebidas a partir de semillas convencionales son fermentaciones mixtas (ácido láctica y alcohólica), cuyos

microorganismos son mayormente pertenecientes al género *Lactobacillus* y *Saccharomyces*. En contraste, para la elaboración de bebidas fermentadas con SNC predomina la fermentación ácido láctica, donde intervienen microorganismos del género *Lactobacillus*, *Bacillus*, *Bifidobacterium* y *Streptococcus*. Cabe resaltar que para el caso de fermentaciones mixtas en semillas convencionales y SNC, existe la posibilidad del uso de un consorcio de microorganismos que estratégicamente se seleccionen para realizar actividades más complejas y así obtener una combinación más vasta de características sensoriales en las bebidas. También, en la tabla I se presentan las variables del proceso de fermentación para la elaboración de bebidas, donde es notable que las bebidas elaboradas con SNC pasan por un periodo menor de fermentación de cuatro a 24 horas, a una temperatura promedio de 37 °C, en comparación con las bebidas fermentadas elaboradas con semillas convencionales que requieren de ocho a 36 horas, a una temperatura promedio de 34 °C.

Tabla I. Clasificación de bebidas fermentadas de acuerdo con el tipo de fermentación y tipo de semillas empleadas

Semillas		Tipo de fermentación	Microorganismo involucrado	Variables de fermentación		SMP (Log UFC/mL)	Referencia
Convencionales	Avena (<i>Avena sativa</i>)	Ácido láctica	<i>Lactobacillus curvatus</i> y <i>Lactobacillus plantarum</i>	T (°C)	30	7 - 8.33	Bernat <i>et al.</i> , 2015; Mamhoud <i>et al.</i> , 2016
				t (h)	12		
	Arroz (<i>Oryza sativa</i>)	Ácido láctica	<i>Lactobacillus fermentum</i> y <i>Lactobacillus plantarum</i>	T (°C)	35 - 37	6.25 - 7.88	Ghosh <i>et al.</i> , 2015; Nissen <i>et al.</i> , 2019; Tripathi y Giri, 2014
				t (h)	36		
	Maíz (<i>Zea mays</i>)	Mixta: ácido láctica y alcohólica	<i>Lactobacillus paracasei</i> y <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	T (°C)	30	6 - 7.6	Menezes <i>et al.</i> , 2018
				t (h)	24		
	Soya (<i>Glycine max</i>)	Ácido láctica	<i>Lactobacillus acidophilus</i> , <i>Lactobacillus casei</i> y <i>Bifidobacterium animalis</i>	T (°C)	37	5 - 7	Cabello-Olmo <i>et al.</i> , 2019; Nagino <i>et al.</i> , 2018
				t (h)	12		

Tabla 1. Clasificación de bebidas fermentadas de acuerdo con el tipo de fermentación y tipo de semillas empleadas (continuación)

Semillas		Tipo de fermentación	Microorganismo involucrado	Variables de fermentación		SMP (Log UFC/mL)	Referencia
Convencionales	Cacahuete (<i>Arachis hypogaea</i>)	Ácido láctica	<i>Pediococcus acidilactici</i> , <i>Lactobacillus lactis</i> , <i>Lactobacillus rhamnosus</i> y <i>Lactobacillus acidophilus</i>	T (°C)	37	<8	Santos <i>et al.</i> , 2014
				t (h)	8		
No convencionales	Cáñamo (<i>Cannabis sativa ssp. sativa</i>)	Ácido láctica	<i>Lactobacillus plantarum</i> , <i>Lactobacillus fermentum</i> , <i>Lactobacillus casei subsp. rhamnosus</i> y <i>Bifidobacterium bifidum</i>	T (°C)	37	8.35 - 10.92	Bartkiene <i>et al.</i> , 2020; Nissen <i>et al.</i> , 2019; Szparaga <i>et al.</i> , 2019
				t (h)	6 - 24		
	Chía (<i>Salvia hispanica</i>)	Ácido láctica	<i>Lactobacillus plantarum</i> , <i>Lactobacillus acidophilus</i> , <i>Lactobacillus kéfir</i> , <i>Streptococcus thermophilus</i> y <i>Bifidobacterium longum</i>	T (°C)	37 - 42	7.5 - 9.5	Bustos <i>et al.</i> , 2017; Kwon <i>et al.</i> , 2019; Montanuci <i>et al.</i> , 2019; Zerbielli, 2014
				t (h)	4		
	Quinoa (<i>Chenopodium quinua</i>)	Ácido láctica	<i>Lactobacillus plantarum</i> , <i>Lactobacillus casei</i> y <i>Lactococcus lactis</i>	T (°C)	30 - 42	9 - 10.5	Bianchi <i>et al.</i> , 2017; El-Deeb <i>et al.</i> , 2014; Li <i>et al.</i> , 2018; Ludena-Urquiza <i>et al.</i> , 2017
Mixta: ácido láctica y alcohólica		t (h)		6 - 24			
Amaranto (<i>Amaranthus tricolor</i>)	Ácido láctica	<i>Lactobacillus rhamnosus</i> y <i>Lactobacillus plantarum</i>	T (°C)	37	7 - 9.81	Adeyanju <i>et al.</i> , 2019; Dabija <i>et al.</i> , 2022; Hernández-García <i>et al.</i> , 2022; Isaac-Bamgboye <i>et al.</i> , 2019	
	Mixta: ácido láctica y alcohólica		t (h)	10 - 12			

Donde T: temperatura, t: tiempo y SMP: supervivencia de microorganismos probióticos.

2. Bebidas fermentadas a partir de semillas no convencionales

En la tabla I se propone una clasificación de bebidas fermentadas elaboradas a partir de semillas convencionales y SNC, donde se resalta el tipo de fermentación y los microorganismos involucrados. Se presenta que, en ambos tipos de semillas, los procesos de fermentación más relevantes son la alcohólica, la ácido láctica y la mixta. Pese a lo anterior, en las siguientes subsecciones se discutirán y compararán sus características, propiedades y variables del proceso con el fin de lograr una mejor distinción entre las bebidas fermentadas elaboradas con semillas convencionales y aquellas elaboradas con SNC.

2.1. Bebidas fermentadas a partir de semillas de cáñamo

Las semillas de cáñamo son frutos de *Cannabis sativa ssp. sativa*, que, en comparación con las extensas aplicaciones del tallo, no se han consolidado como materia prima en la industria. Sin embargo, se ha presentado interés científico atribuido a la reciente evidencia acerca de su prometedora composición nutricional. De una manera general, la composición de las semillas del cáñamo es aproximadamente 36 % de lípidos, 25 % de proteína, 28 % de fibra y 6 % de humedad (Bartkiene *et al.*, 2020; Crescente *et al.*, 2018; Leonard *et al.*, 2020).

La fracción lipídica de las semillas de cáñamo está dominada por ácidos grasos esenciales; ácido linoleico, ácido alfa-linolénico y ácido oleico (Crescente *et al.*, 2018), los cuales se conocen por brindar efectos protectores contra las enfermedades cardiovasculares, la obesidad y la diabetes *mellitus* (Patterson *et al.*, 2012). En comparación con otros aceites vegetales, el aceite de semillas de cáñamo tiene una mayor proporción de ácidos grasos poliinsaturados, lo cuales se han relacionado con la reducción de riesgos de enfermedades cardiovasculares, cáncer, artritis reumatoide, hipertensión, enfermedades inflamatorias y autoinmunes (Crescente *et al.*, 2018). Por otra parte, se han identificado en las semillas de cáñamo un total de 181 proteínas, siendo la globulina edestina (67 % a 75 %) y la albúmina globular (25 % a 37 %) las dos principales proteínas de almacenamiento (Bartkiene *et al.*, 2020).

Con respecto a los carbohidratos, la mayoría de ellos son fibras insolubles que residen en la capa externa de las semillas de cáñamo, por lo que durante el descascarillado se eliminan tres cuartas partes de estos (Crescente *et al.*, 2018). De otro modo, las semillas de cáñamo son fuente de minerales, principalmen-

te de potasio, fósforo y magnesio. A su vez, estas son ricas en compuestos fenólicos, ya que se han identificado aproximadamente 500 compuestos que incluyen compuestos bioactivos como ácidos hidroxicinámicos, ácidos hidroxibenzoicos, flavonoides y lignanamidas. Las propiedades antioxidantes de las lignanamidas en las semillas de cáñamo se han documentado en varios estudios y se ha reportado a N-trans-caffeoltiramina y su capacidad de supresión de la oxidación de lipoproteínas de baja densidad; Cannabisin B y su efecto inhibitorio de la oxidación; así como 3,3' dimetil-heliotropamida y su potente actividad de eliminación de radicales DPPH al 81.5 %, etc. (Ángeles López *et al.*, 2014; Leonard *et al.*, 2020; Martínez *et al.*, 2020; Russo y Reggiani, 2013).

El uso de semillas de cáñamo para la producción de alimentos y bebidas es poco usual debido a su reputación y naturaleza. Actualmente, no es común que se adicionen a bebidas fermentadas, pero existen estudios donde se producen bebidas similares a los sustitutos de bebidas lácteas y se aborda el proceso, características, propiedades nutricionales, funcionales y de calidad sensorial (Bartkiene *et al.*, 2020; Nissen *et al.*, 2019; Szparaga *et al.*, 2019).

En un estudio reportado por Nissen *et al.* (2020), se llevó a cabo la elaboración de bebidas fermentadas a base de semillas de cáñamo (similares a sustitutos de yogur). Para el proceso de fermentación ácido láctica se usaron las bacterias *L. plantarum*, *L. fermentum* y *Bifidobacterium bifidum*. La carga celular de las bacterias inoculadas se estandarizó en 6 Log UFC/mL y la fermentación de las bebidas se realizó durante 24 horas a 37 °C. Los autores reportaron que las formulaciones presentadas de bebidas de semillas de cáñamo mostraron un crecimiento y supervivencia de cepas probióticas y actividad prebiótica posterior al proceso de fermentación, obteniendo los mejores resultados con el uso de bacterias *B. bifidum* y *L. plantarum*, con una mayor actividad probiótica promedio de ambas bacterias de 0.339 Log UFC/mL y una supervivencia probiótica promedio de ambas bacterias de 8.35 Log UFC/mL. Las bebidas control elaboradas a partir de arroz presentaron valores de 0.105 Log UFC/mL de actividad probiótica, y una supervivencia probiótica de 7.17 Log UFC/mL, usando los mismos microorganismos probióticos. Los resultados anteriores se relacionan con el alto contenido de acetato (8.37 mg/kg), propionato (0.68 mg/kg) y butirato (0.81 mg/kg) reportado en las bebidas fermentadas de semillas de cáñamo, corroborados por Bartkiene *et al.* (2020). Estos compuestos bioac-

tivos, además de brindar los beneficios discutidos, contribuyen al crecimiento microbiológico selectivo de probióticos (FAO *et al.*, 2006; Sánchez *et al.*, 2015).

Por otro lado, se identificaron compuestos terpenos en las bebidas fermentadas de semillas de cáñamo, tales como Δ -3-careno, β -mirceno, β -cariofileno y trans- β -ocimeno, los cuales son característicos y provenientes de las semillas de cáñamo (Martínez *et al.*, 2020). La presencia de estos compuestos demostró tener efectos sinérgicos, antioxidantes y antimicrobianos, así como ser precursores de sabores y aromas característicos para las bebidas fermentadas con semillas de cáñamo (Martínez *et al.*, 2020; Nissen *et al.*, 2019).

De manera similar Szparaga *et al.* (2019) elaboraron una bebida fermentada de semillas de cáñamo para determinar la capacidad de supervivencia de los cultivos de bacterias probióticas. La bebida de semillas de cáñamo estudiada se fermentó usando bacterias *L. casei* subsp. *rhamnosus* a una temperatura de 37 °C durante seis horas. Los autores encontraron que uno de los grandes beneficios del uso de semillas de cáñamo en la elaboración de bebidas fermentadas es el aporte proteico a la bebida (Akin y Ozcan, 2017). Se obtuvo un valor de 6.96 g/100 mL, que sobrepasa el contenido de proteínas en otras bebidas fermentadas con semillas convencionales como avena 0.65 g/100 mL (Bernat *et al.*, 2015) y maíz 3.23 g/100 mL (Valero-Cases *et al.*, 2020). Igualmente, dilucidaron que el proceso de fermentación contribuyó a una mayor capacidad de supervivencia de *L. casei* subsp. *rhamnosus*, debido a que el desarrollo de microorganismos pasó de 8.41 Log UFC/mL a 10.92 Log UFC/mL. También, recientemente, los autores Bartkiene *et al.* (2020) confirmaron lo anterior, puesto que estudiaron el uso de *L. casei* en bebidas fermentadas de semillas de cáñamo y obtuvieron un incremento de supervivencia de probióticos de 8.47 Log UFC/mL a 9.47 Log UFC/mL.

En la tabla I se presenta que las bebidas de semillas de cáñamo fueron elaboradas mediante procesos de fermentación

ácido láctica por medio de *L. casei*, *L. plantarum*, *L. fermentum* y *B. bifidum*. Se observa que esta clase de microorganismos se ha reportado frecuentemente en la elaboración de bebidas con SNC (Bartkiene *et al.*, 2020; Bianchi *et al.*, 2017; Ludena-Urquiza *et al.*, 2017; Szparaga *et al.*, 2019) en comparación con aquellas elaboradas con semillas convencionales (Cabello-Olmo *et al.*, 2019; Nagino *et al.*, 2018). Además, en la tabla I se presenta que la supervivencia de probióticos en las bebidas fermentadas a partir de semillas de cáñamo es mayor (>10 Log UFC/mL) a la supervivencia reportada por bebidas elaboradas con semillas convencionales (5 a 8 Log UFC/mL).

2.2. Bebidas fermentadas a partir de semillas de chía

La chía (*Salvia hispanica* L.) es una planta anual de origen mexicano que crece en un área que se extiende desde el oeste de México hasta el norte de Guatemala. Con respecto a su composición, las semillas de chía tienen un alto potencial nutricional puesto que contienen de 16 a 26 % de proteína, 31 a 34 % de lípidos, 37 a 45 % de carbohidratos y 23 a 35 % de fibra dietética. Además, son una fuente de minerales (calcio, potasio, fósforo y magnesio), vitaminas (tiamina, riboflavina, niacina, ácido fólico, ácido ascórbico y vitamina A) y compuestos antioxidantes (Valero-Cases *et al.*, 2020).

Las semillas de chía contienen ácidos grasos poliinsaturados, como el ácido alfa-linolénico ω -3 y el ácido alfa-linolénico ω -6. En comparación con otros aceites vegetales, el aceite de semillas de chía se caracteriza por un alto contenido de ácidos grasos poliinsaturados. En adición, la mayoría de proteínas presentes son prolaminas (538 g/kg de proteína cruda), seguidas de glutelinas (230 g/kg de proteína cruda), globulinas (70 g/kg de proteína cruda) y albúminas (39 g/kg de proteína cruda) (Kulczyński *et al.*, 2019). Asimismo, las semillas de chía poseen un alto contenido de fibra dietética total (56.46 g/100 g), compuestas principalmente de fibra dietética insoluble (53.45 g/100 g) con una peque-

ña cantidad de fibra dietética soluble (3.01 g/100 g). Finalmente, se han detectado compuestos bioactivos en las semillas de chía como tocoferoles, esteroides (aprox. 50 % β -sitosterol), y compuestos polifenólicos, como ácido protocatecuico, ácido gálico, ácido *p*-cumárico, ácido cafeico, ácido clorogénico, así como epicatequina, quercetina, kaempferol, rutina y apigenina (Din *et al.*, 2021; Kulczyński *et al.*, 2019; Marcinek y Krejpcio, 2017).

Las propiedades nutricionales de las semillas de chía, tales como alto contenido de ácidos grasos poliinsaturados, proteína vegetal, fibra dietética, vitaminas, minerales y sustancias bioactivas dan lugar a numerosos estudios sobre estas semillas con el fin de demostrar sus propiedades, características y aplicaciones en la industria de alimentos. Actualmente, escasean los estudios donde se elaboren bebidas fermentadas no lácteas de semillas de chía; sin embargo, existen diversas investigaciones científicas en las cuales se elaboran otro tipo de bebidas y alimentos fermentados con semillas de chía (Bustos *et al.*, 2017; Kwon *et al.*, 2019; Montanuci *et al.*, 2019; Zambrano Muñoz, 2016; Zerbielli, 2014).

Un estudio realizado por Bustos *et al.* (2017) demostró que las semillas de chía pueden ser fermentadas y posteriormente aplicarse en alimentos. Las semillas de chía fueron fermentadas utilizando la cepa ácido láctica *L. plantarum* a 37 °C durante 24 horas. Los autores encontraron que después de 24 horas de fermentación, la concentración de compuestos fenólicos y la actividad antioxidante (AA) en las semillas de chía aumentaron pasando de 14.90 GAE mg/g a 20.80 GAE mg/g y 52 % AA a 85.9 % AA, respectivamente. Además, se reportó que la fermentación ácido láctica fomentó la presencia de fracciones de ácidos orgánicos (ácido láctico, acético y feniláctico) de 12.3 g/kg, 1 g/kg y 23.8 μ g/kg, respectivamente. Lo anterior se considera un efecto positivo y deseable ya que estos ácidos son agentes antimicrobianos producidos por algunas cepas de BAL (Gerez *et al.*, 2010). También, los autores observaron un aumento en compuestos bioactivos provenientes de las semillas de chía (ácido cumárico,

benzoico, cafeico, ferúlico, clorogénico y dihidroxibenzoico, kaempferol, galangina y quercetina), así como el desarrollo de otro compuesto bioactivo tras el proceso de fermentación (ácido ferúlico 2.5 mg/g).

Desde otra perspectiva, una investigación realizada por Kwon *et al.* (2019) abordó la adición de extractos de semillas de chía para la producción de bebidas lácteas fermentadas. El extracto de semillas de chía se añadió a leche descremada y se inoculó con *Lactobacillus acidophilus*, *Streptococcus thermophilus* y *Bifidobacterium longum*. Posteriormente, se llevó a fermentar la bebida a 42 °C hasta alcanzar un pH de 4.6. Los autores encontraron que la suplementación con esta SNC redujo el tiempo fermentación de seis a cuatro horas y aceleró el crecimiento de las bacterias ácido lácticas en un promedio entre 7 Log UFC/mL y 9.5 Log UFC/mL, en comparación a la bebida láctea sin adición de semillas de chía (<6 Log UFC/mL). Se llegó a la conclusión de que la suplementación de este tipo de bebidas fermentadas con semillas de chía mejora 1.4 % la viabilidad de las bacterias probióticas presentes. Dichas aseveraciones coinciden con lo reportado por otros estudios de bebidas lácteas adicionadas con chía como Montanuci *et al.* (2019), donde obtuvieron un recuento de probióticos *Lactobacillus kéfir* de 8.12 Log UFC/mL y *Bifidobacterium* de 7.92 Log UFC/mL. También Zerbielli (2014) reportó un recuento de probióticos *Lactobacillus acidophilus* 7.35 Log UFC/mL y *Bifidobacterium* de 7.19 Log UFC/mL en su bebida láctea adicionada con chía.

En la tabla I se presenta que estos estudios, donde se implementa el uso de la chía como SNC, aplicaron una fermentación ácido láctica por medio de bacterias del género *Lactobacillus*, *Streptococcus* y *Bifidobacterium*. La clase de microorganismos empleados para las bebidas fermentadas de chía concuerda con los microorganismos que se suelen aplicar para la elaboración de bebidas fermentadas con semillas convencionales, como la soya (Cabello-Olmo *et al.*, 2019; Nagino *et al.*, 2018). Asimismo,

en la tabla I se muestra que la supervivencia de probióticos en las bebidas fermentadas a partir de semillas de chía es mayor (7 a 9,5 Log UFC/mL) a la supervivencia reportada por bebidas elaboradas con semillas convencionales como bebidas de arroz, maíz y soya (5 a 8 Log UFC/mL).

2.3. Bebidas fermentadas a partir de semillas de quinua

La quinua (*Chenopodium quinua*, L.) es el pseudocereal más utilizado como materia prima alimenticia y pertenece a la familia *Chenopodiaceae*, nativo de la región andina de América del Sur. Respecto a la composición, el contenido de proteínas de la quinua (13 a 14 %) es poco mayor que el de la mayoría de otras semillas o pseudocereales y su calidad de proteína es comparable con alimentos de origen animal. El contenido de lípidos oscila entre 5 y 9,7 % y el de carbohidratos entre 52 y 69 % (mayormente de almidón). En adición, las semillas de quinua son el único alimento de origen vegetal que tiene todos los aminoácidos esenciales (fenilalanina, isoleucina, lisina, metionina, treonina, triptófano, valina; arginina, histidina, cistina y tirosina), así como oligoelementos y vitaminas. Además, las semillas de quinua tienen ácidos grasos de alta calidad ($\omega 6$, $\omega 3$ y $\omega 9$) y altas concentraciones de polifenoles y antioxidantes como α y γ tocoferol, los cuales se han distinguido por su actividad anticancerígena y antiinflamatoria. Por último, estas semillas son una buena fuente de minerales (calcio, cobre, hierro, magnesio, manganeso y zinc) y ácido fólico en cantidades más altas que otras semillas convencionales (Belton y Taylor, 2002; Bianchi *et al.*, 2017; Ludena-Urquiza *et al.*, 2017).

Debido al aporte nutricional de las semillas de quinua y su aplicación a alimentos y bebidas fermentadas, actualmente se han reportado algunas investigaciones con esta SNC que buscan asemejarse a los productos lácteos (Bianchi *et al.*, 2017; El-Deeb *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2018; Ludena-Urquiza *et al.*, 2017).

Un estudio realizado por Ludena-Urquiza *et al.* (2017) presentó el uso de dos variedades de quinua como matrices alimenticias adecuadas para el desarrollo de bebidas fermentadas. Para la elaboración de las bebidas fermentadas a base de quinua se

inocularon *L. plantarum*, *L. casei* y *Lactococcus lactis* para un proceso de fermentación ácido láctica durante seis horas a 30 °C. Posterior a un almacenamiento de 21 días a 4 °C, las bebidas fermentadas con semillas de quinua mostraron un incremento de 9 Log UFC/mL a 10,5 Log UFC/mL de probióticos. A su vez, la investigación realizada por Bianchi *et al.* (2016) coincidió en que las bebidas elaboradas con semillas de quinua e inoculadas con *L. casei* presentan una supervivencia de probióticos de 9,02 Log UFC/mL a 10,38 Log UFC/mL.

Además, un artículo publicado por Li *et al.* (2018) mostró el efecto de la adición de semillas de quinua y la fermentación con *L. casei* sobre el contenido de proteína, aminoácidos, tiamina (B1) y riboflavina (B2) en una bebida refrescante. El proceso de fermentación se llevó a cabo por 4 horas a 42 °C. Primeramente, se reportó que la bebida fermentada con semillas de quinua obtuvo un incremento significativo en el contenido de proteínas, pasando de 13,57 g/100 g a 17,24 g/100 g. También se mencionó un incremento de tiamina y riboflavina de 0,3 mg/100 g a 0,42 mg/100 g y de 0,4 a 0,5 mg/100 g, respectivamente. Por otra parte, el proceso de fermentación de la SNC quinua aumentó la actividad antioxidante de 6,46 % a 13,98 % y el contenido fenólico total de 13,85 GAE mg/g a 16,53 GAE mg/g. En cuanto a la composición de aminoácidos, la bebida fermentada de quinua mostró un aumento en aminoácidos esenciales, principalmente leucina, con un incremento de 97,6 % e isoleucina con un incremento del 700 %.

En la tabla I se presenta que las clases de microorganismos empleados (*L. casei*, *L. plantarum* y *L. lactis*) para la elaboración de bebidas fermentadas con semillas de quinua, se han reportado previamente para la elaboración de bebidas fermentadas con semillas convencionales como soya (Cabello-Olmo *et al.*, 2019; Nagino *et al.*, 2018), cacahuete (Wang *et al.*, 2014), avena (Bernat *et al.*, 2015; Johansson *et al.*, 1998; Mamhoud *et al.*, 2016) y bebidas a base de arroz (Ghosh *et al.*, 2015; Tripathi y Giri, 2014). Sin embargo, los estudios revelan que el uso de SNC y la aplicación de dichos microorganismos en bebidas fermentadas brindan mejores características nutricionales como el contenido de

proteínas, vitaminas y compuestos fenólicos. A su vez, se observa que la supervivencia de probióticos en las bebidas fermentadas a partir de semillas de quinua es mayor (9 a 10.5 Log UFC/mL) a la supervivencia reportada por bebidas elaboradas con semillas convencionales (5 a 9 Log UFC/mL).

2.4. Bebidas fermentadas a partir de semillas de amaranto

El amaranto (*Amaranthus tricolor*) es un pseudocereal que se produce principalmente en zonas áridas y semiáridas de África Oriental y América Central como cultivo alternativo para apoyar la producción alimentaria. Esto se debe a que el amaranto es un cultivo con semillas que poseen alta calidad nutricional para la aplicación en alimentos y bebidas. El amaranto, altamente resistente a la sequía, puede producirse en poco tiempo con alto rendimiento y utilizarse como una buena fuente de proteínas y ácidos grasos no saturados (Paredes-Lopez, 2018; Venskutonis y Kraujalis, 2013).

Las semillas de amaranto se componen principalmente de 61.3 a 76.5 % de carbohidratos (mayormente almidón), 13.1 a 21.5 % de proteína cruda, 5.6 a 10.9 % de lípidos, 2.7 a 5 % de fibra cruda y 2.5 a 4.4 % de cenizas (Venskutonis y Kraujalis, 2013). Se ha descrito que el amaranto posee una excelente composición nutricional de mayor contenido proteico y de mejor calidad y contenido de lípidos en comparación con las semillas convencionales. Los lípidos son constituyentes nutritivos muy importantes de las semillas de amaranto, siendo los triacilgliceroles (TAG), fosfolípidos y vitaminas liposolubles (como los tocoferoles) los componentes principales en la fracción lipídica. Los ácidos grasos encontrados en el amaranto han sido el ácido palmítico (19.1 a 23.4 %), ácido oleico (18.7 a 38.9 %) y ácido linoleico (36.7 a 55.9 %). Sin embargo, existen notables distinciones porcentuales debido a la existencia de diferentes especies y cultivares. También, las semillas de amaranto son ricas en lisina, un aminoácido limitante para las semillas, ya que se suele encontrar en bajas concentraciones. La calidad de proteínas de las semillas de amaranto es evidente por su alto índice de aminoácidos esenciales

(90.4 %), lo que permite una comparación con la calidad proteica presente en el huevo. Finalmente, varios componentes menores, como fitoesteroles, ceras y alcoholes terpénicos, se han reportado en diferentes especies de semillas de amaranto (Bressani, 1994; Paredes-Lopez, 2018; Venskutonis y Kraujalis, 2013).

Las semillas de amaranto han sido evaluadas y aplicadas como ingrediente en bebidas y bebidas fermentadas. Los estudios de composición, usos, propiedades y efectos consecuentes del consumo de semillas de amaranto se han expandido rápidamente durante las últimas décadas y se ha publicado mucha información científica y tecnológica nueva. Por otro lado, se han reportado algunos artículos de revisión sobre diferentes aspectos del procesamiento y la utilización de semillas de amaranto en bebidas fermentadas innovadoras como las bebidas probióticas saborizadas variantes al *Kunuis* (Adeyanju *et al.*, 2019; Dabija *et al.*, 2022; Hernández-García *et al.*, 2022; Kockova y Valík, 2014).

Adeyanju *et al.* (2019) aplicaron el uso de semillas de amaranto para la producción de diferentes bebidas fermentadas empleando *L. rhamnosus* con una fermentación ácido láctica durante 18 horas a 37 °C. Los resultados mostraron una supervivencia de microorganismos probióticos de 9.81 Log UFC/mL y después de 21 días de almacenamiento se reportaron niveles de probióticos mayores a 6 Log UFC/mL, por lo tanto, estaría por encima del valor requerido para considerarse una bebida con probióticos (FAO *et al.*, 2006; Sánchez *et al.*, 2015). Los datos anteriores fueron corroborados por el estudio realizado por Hernández-García *et al.* (2022) donde se usaron bacterias *L. plantarum* y *L. rhamnosus* para fermentar bebidas de amaranto y lograron obtener supervivencia de los microorganismos durante 15 días, siendo los recuentos de los probióticos superiores a 7 Log UFC/mL. Por otra parte, los autores Adeyanju *et al.* (2019) reportaron que el contenido de proteína para la bebida fermentada elaborada con semillas de amaranto fue mayor (14.5 g/100 g) con respecto a lo que reportan Nagino *et al.* (2018) y su bebida fermentada elaborada con semillas de soya (12.3 g/100g). La bebida elaborada con la SNC mostró una mayor bioaccesibilidad de hierro y una equiparable bioaccesibilidad de zinc (0.42 mg/100 g y

0.26 mg/100 g) en comparación con la bebida fermentada de soya (0.35 mg/100 g y 0.28 mg/100 g).

Existe ya una bebida fermentada de semillas de amaranto llamada *Kunuis*. Esta es una bebida popular, indígena, fermentada y no alcohólica a menudo consumida en Nigeria. Tiene un sabor agrídulce, apariencia cremosa y baja viscosidad. Por lo general, se aromatiza con pimienta negra, jengibre o pimienta roja para aumentar el sabor y el aroma, sirve como purgante, remedio contra las flatulencias y se considera un potenciador de la lactancia (Sánchez *et al.*, 2015). *Kunuis* es una bebida relativamente barata y más nutritiva en comparación con las bebidas carbonatadas. El proceso de fermentación (mixta) involucra los microorganismos nativos de las semillas de amaranto (*L. fermentum*, *L. leichmannii*, *B. subtilis*, *S. cerevisiae*) y se aplica durante ocho horas a 26 °C (Efiuvwevwere y Akona, 1995; Isaac-Bamgboye *et al.*, 2019). De igual forma Dabija *et al.* (2022) ilustra en su investigación las formas ya existentes de la aplicación de semillas de amaranto para la elaboración de cerveza fermentada por levaduras de género *Saccharomyces*. Estas bebidas resaltan por el alto contenido de compuestos provenientes de las semillas de amaranto tales como rutina, isoquercetina, nicotiflorina, ácido vanílico, ácido 4-hidroxibenzoico y ácido siríngico; los cuales han sido relacionados con efectos antioxidantes, antidiabéticos, antiinflamatorios, antirreumáticos y analgésicos (Hernández-García *et al.*, 2022; Paredes-Lopez, 2018).

Como se observa en la tabla I, estas bebidas fueron elaboradas mediante el uso de una SNC con un proceso de fermentación ácido láctica, fermentación alcohólica y fermentación mixta. Los microorganismos que llevaron a cabo dicho proceso son principalmente del género *Lactobacillus* y *Saccharomyces*. Estos últimos coinciden con los microorganismos que se suelen aplicar para la elaboración de bebidas fermentadas con semillas no convencionales como bebidas a base de cáñamo (Bartkiene *et al.*, 2020; Nissen *et al.*, 2019; Szparaga *et al.*, 2019) y quinua (Bianchi *et al.*, 2017; El-Deeb *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2018; Ludena-Urquiza *et al.*, 2017). Además, en la tabla I se observa que la supervivencia de probióticos en las bebidas fermentadas a partir de semillas de amaranto es comparablemente mayor (7 a 9.81 Log

UFC/mL) a la supervivencia reportada por bebidas elaboradas con semillas convencionales (5 a 9 Log UFC/mL).

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Las semillas convencionales se utilizan para la producción de alimentos y bebidas en todo el mundo y se consideran una de las fuentes más importantes de carbohidratos, proteínas, fibra dietética, minerales y vitaminas en nuestra dieta. Sin embargo, existe la necesidad de explorar matrices alimentarias alternativas y novedosas que sean capaces de ofrecer nuevas características y propiedades a los alimentos. Recientes investigaciones asientan una base útil y sólida del uso de semillas no convencionales como el cáñamo, la chía, la quinua y el amaranto para elaborar bebidas fermentadas. El aprovechamiento de las SNC representa un nicho de oportunidad para el desarrollo de nuevos productos alimenticios que contribuyan al desarrollo de la producción de nuevas e innovadoras bebidas fermentadas con mayor contenido de compuestos nutritivos, probióticos y compuestos bioactivos. No obstante, se necesitan más investigaciones y ensayos clínicos, como los modelos dinámicos *in vitro*, para describir el cambio del crecimiento microbiano, la inhibición de patógenos atribuida y la supervivencia de microorganismos benéficos. Igualmente, ensayos *in vivo* para demostrar que el uso de semillas no convencionales en bebidas fermentadas puede aportar beneficios tras su consumo.

AGRADECIMIENTOS

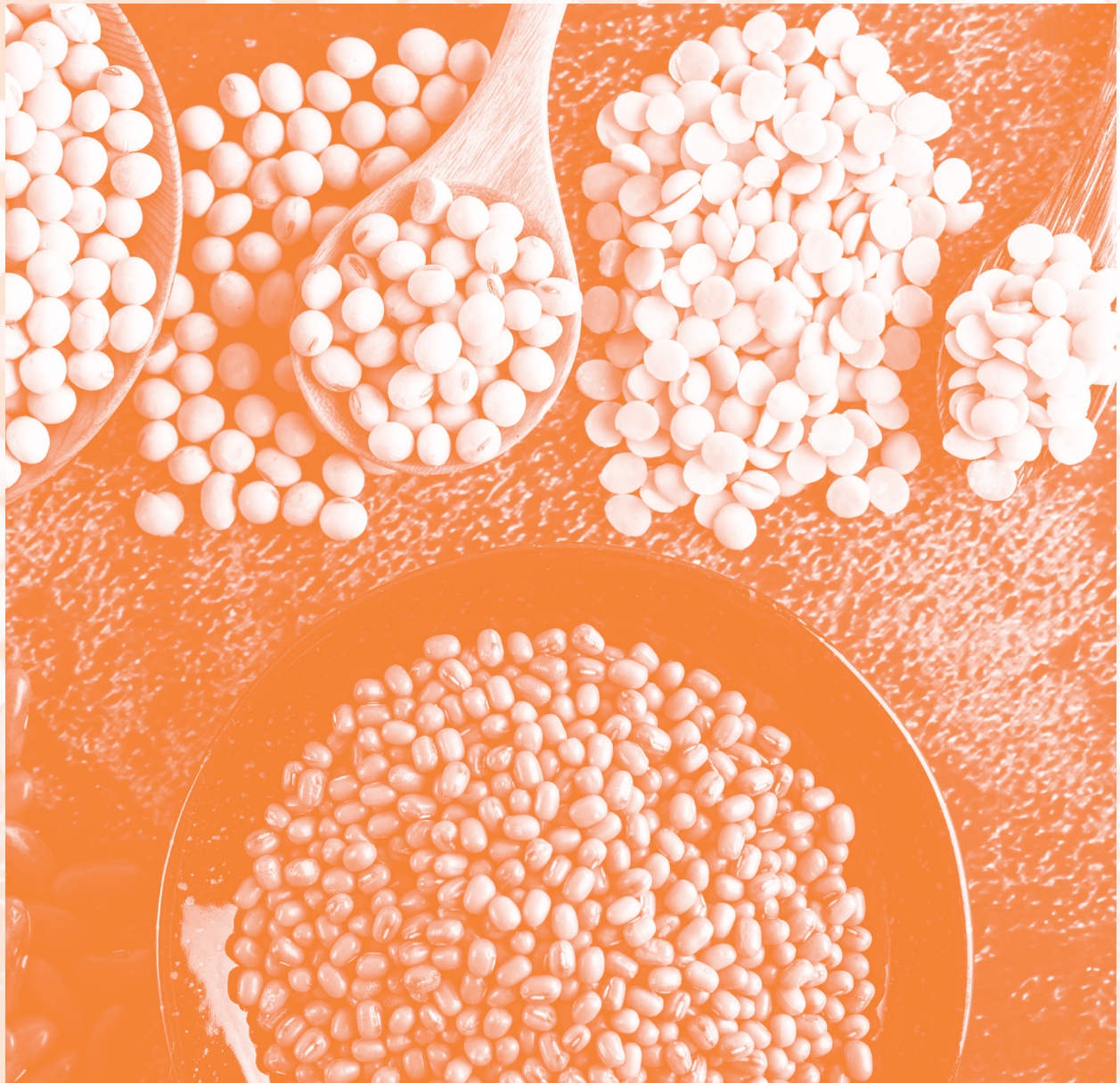
La autora Reyes-Flores agradece el apoyo recibido por parte del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) —hoy Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)— para la realización de sus estudios de posgrado.

REFERENCIAS

- Adebo, O. A. (2020). African sorghum-based fermented foods: past, current and future prospects. *Nutrients*, 12(4), 1111. <https://doi.org/10.3390/nu12041111>
- Adeyanju, A. A., Kruger, J., Taylor, J. R. N. y Duodu, K. G. (2019). Effects of different souring methods on the protein quality and iron and zinc bioaccessibilities of non-alcoholic beverages from sorghum and amaranth. *International Journal of Food Science & Technology*, 54(3), 798-809. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13998>
- Admassie, M. (2018). A review on food fermentation and the biotechnology of lactic acid bacteria. *World Journal of Food Science and Technology*, 2, 19. <https://doi.org/10.11648/j.wjfst.20180201.13>
- Akin, Z. y Ozcan, T. (2017). Functional properties of fermented milk produced with plant proteins. *LWT*, 86, 25-30. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.07.025>
- Ángeles-López, G. E., Brindis, F., Cristians-Niizawa, S. y Ventura-Martinez, R. (2014). *Cannabis sativa* L., una planta singular. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 45(4), 1-6.
- Bartkiene, E., Zokaityte, E., Lele, V., Sakiene, V., Zavistanaviciute, P., Klupsaite, D., Bendoraitiene, J., Navikaite-Snipaitiene, V. y Ruzauskas, M. (2020). Technology and characterisation of whole hemp seed beverages prepared from ultrasonicated and fermented whole seed paste. *International Journal of Food Science & Technology*, 55(1), 406-419. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14285>
- Belton, P. S. y Taylor, J. R. N. (2002). *Pseudocereals and Less Common Cereals*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-09544-7>
- Bernat, N., Cháfer, M., González-Martínez, C., Rodríguez-García, J. y Chiralt, A. (2015). Optimisation of oat milk formulation to obtain fermented derivatives by using probiotic *Lactobacillus reuteri* microorganisms. *Food Science and Technology International = Ciencia y Tecnología de los Alimentos Internacional*, 21(2), 145-157. <https://doi.org/10.1177/1082013213518936>
- Bhardwaj, S., Kapoor, B., K Devi, Y. y Kapoor, D. (2020). Different seeds in food industry: health benefits and industrial applications. *Plant Archives*, 20, 8486-8490.
- Bianchi, F., Rossi, E., Gomes, R. y Sivieri, K. (2017). Potentially synbiotic fermented beverage with aqueous extracts of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) and soy. *Food Science and Technology International*, 21(6), 403-415. <https://doi.org/10.1177/1082013214540672>
- Bressani, R. (1994). Composition and Nutritional Properties of Amaranth. En *Amaranth Biology, Chemistry, and Technology*. CRC Press.
- Bustos, A. Y., Gerez, C. L., Mohtar Mohtar, L. G., Paz Zanini, V. I., Nazareno, M. A., Taranto, M. P. y Iturriaga, L. B. (2017). Lactic acid fermentation improved textural behavior, phenolic compounds and antioxidant activity of Chia (*Salvia hispanica* L.) Dough. *Food Technology and Biotechnology*, 55(3), 381-389. <https://doi.org/10.17113/ftb.55.03.17.5133>
- Cabello-Olmo, M., Oneca, M., Torre, P., Sainz, N., Moreno-Aliaga, M. J., Guruceaga, E., Díaz, J. V., Encio, I. J., Barajas, M. y Araña, M. (2019). A fermented food product containing lactic acid bacteria protects ZDF rats from the development of type 2 Diabetes. *Nutrients*, 11(10), 2530. <https://doi.org/10.3390/nu11102530>
- Contreras, C. y Del Campo, M. (2015). Productos de la fermentación alcohólica; un beneficio para la salud. *Cartagena T.I.Q 660.2 C764 CD-ROM*. <http://biblioteca.digital.usb.edu.co/handle/10819/2613>
- Crescente, G., Piccolella, S., Esposito, A., Scognamiglio, M., Fiorentino, A. y Pacifico, S. (2018). Chemical composition and nutraceutical properties of hempseed: An ancient food with actual functional value. *Phytochemistry Reviews*, 17(4), 733-749. <https://doi.org/10.1007/s11101-018-9556-2>
- Dabija, A., Ciocan, M. E., Chetariu, A. y Codină, G. G. (2022). Buckwheat and Amaranth as Raw Materials for Brewing, a Review. *Plants*, 11(6), 756. <https://doi.org/10.3390/plants11060756>
- Deshpande, S. S. y Nations, F. (2000). *Fermented Grain Legumes, Seeds and Nuts: A Global Perspective*. Food & Agriculture Org.
- Din, Z., Alam, M., Ullah, H., Shi, D., Xu, B., Li, H. y Xiao, C. (2021). Nutritional, phytochemical and therapeutic potential of chia seed (*Salvia hispanica* L.). A mini-review. *Food Hydrocolloids for Health*, 1, 100010. <https://doi.org/10.1016/j.fhfh.2021.100010>
- Efiuwewere, B. J. y Akona, O. (1995). The microbiology of «kunun-zaki», a cereal beverage from northern Nigeria, during the fermentation (production) process. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 11(5), 491-493. <https://doi.org/10.1007/BF00286358>
- El-Deeb, A. M., Hassan, N. S. Y. y Hassanein, A. M. (2014). Preparation and properties of flavored fermented beverage based on partial or complete replacement of milk with Quinoa Seeds Water Extract (QSWE). *International Journal of Dairy Science*, 9(4), 96-105.
- Erkmen, O. y Bozoğlu, T. F. (2016). *Food microbiology: Principles into practice*. John Wiley & Sons.
- FAO y Grupo de Trabajo Conjunto FAO/OMS (2006). *Probióticos en los alimentos. Propiedades saludables y nutricionales y directrices para la evaluación*. Roma. FAO/WHO. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/a0512e/a0512e00.pdf>
- Gastineau, C. (2013). *Fermented Food Beverages in Nutrition*. Elsevier.

- Gerez, C. L., Torino, M. I., Obregozo, M. D. y De Valdez, G. F. (2010). A Ready-to-Use Antifungal Starter Culture Improves the Shelf Life of Packaged Bread. *Journal of Food Protection*, 73(4), 758-762. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-73.4.758>
- Ghosh, K., Ray, M., Adak, A., Halder, S. K., Das, A., Jana, A., Parua, S., Vágvölgyi, C., Das Mohapatra, P. K., Pati, B. R. y Mondal, K. C. (2015). Role of probiotic *Lactobacillus fermentum* KK11 in the preparation of a rice based fermented beverage. *Bioresource Technology*, 188, 161-168. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.130>
- Grumezescu, A. M. y Holban, A. M. (2019). *Fermented Beverages: Volume 5. The Science of Beverages*. Woodhead Publishing.
- Hasan, M., Sultan, Z. y Mar-E-Um, M. (2014). Significance of fermented food in nutrition and food science. *Journal of Scientific Research*, 6.
- Hernández-García, Y., Melgar-Lalanne, G., Téllez-Medina, D. I., Ruiz-May, E., Salgado-Cruz, Ma. de la P., Andrade-Velásquez, A., Dorantes-Álvarez, L., López-Hernández, D. y Santiago Gómez, M. P. (2022). Scavenging peptides, antioxidant activity, and hypoglycemic activity of a germinated amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.) beverage fermented by *Lactiplantibacillus plantarum*. *Journal of Food Biochemistry*, e14139. <https://doi.org/10.1111/jfbc.14139>
- Hui, Y. H., Meunier-Goddik, L., Josephsen, J., Nip, W. K. y Stanfield, P. S. (2004). *Handbook of Food and Beverage Fermentation Technology*. CRC Press.
- Huq, M. S., Amin, M. R., Dawlatana, M. y Rahim, M. M. (1988). *Introduction of non-conventional oilseeds as sources of edible oil [in Bangladesh]*. 13. Annual Bangladesh Science Conference, Dhaka (Bangladesh), 29-31 May 1988. <https://agris.fao.org/search/en/providers/122479/records/6471ca0d77fd37171a6f54fb>
- Isaac-Bamgboye, F., Osundahunsi, O. y Edema, M. (2019). *Nutritional Quality, Physicochemical Properties And Sensory Evaluation Of Amaranth-Kunu Produced From Fermented Grain Amaranth (Amaranthus Hybridus)*.
- Johansson, M. L., Nobaek, S., Berggren, A., Nyman, M., Björck, I., Åhrné, S., Jeppsson, B. y Molin, G. (1998). Survival of *Lactobacillus plantarum* DSM 9843 (299v), and effect on the short-chain fatty acid content of faeces after ingestion of a rose-hip drink with fermented oats. *International Journal of Food Microbiology*, 42(1), 29-38.
- Kockova, M. y Valík, L. (2014). Development of new cereal-, pseudocereal-, and cereal-leguminous-based probiotic foods. *Czech Journal of Food Sciences*, 32(4), 391-397.
- Kulczyński, B., Kobus-Cisowska, J., Taczanowski, M., Kmiecik, D. y Gramza-Michałowska, A. (2019). The chemical composition and nutritional value of chia seeds: current state of knowledge. *Nutrients*, 11(6), 1242. <https://doi.org/10.3390/nu11061242>
- Kwon, H. C., Bae, H., Seo, H. G. y Han, S. G. (2019). Short communication: Chia seed extract enhances physicochemical and antioxidant properties of yogurt. *Journal of Dairy Science*, 102(6), 4870-4876. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-16129>
- Leonard, W., Zhang, P., Ying, D. y Fang, Z. (2020). Hempseed in food industry: Nutritional value, health benefits, and industrial applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(1), 282-308. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12517>
- Li, S., Chen, C., Ji, Y., Lin, J., Chen, X. y Qi, B. (2018). Improvement of nutritional value, bioactivity and volatile constituents of quinoa seeds by fermentation with *Lactobacillus casei*. *Journal of Cereal Science*, 84, 83-89. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2018.10.008>
- Lima, J., Inês, M., Pereira, C., Ivanov, M., Soković, M., Steinmacher, N., Ferreira, I. y Barros, L. (2021). Characterization of nonconventional food plants seeds *Guizotia Abyssinica* (L. f.) Cass., *Panicum Miliaceum* L., and *Phalaris Canariensis* L. for Application in the bakery industry. *Agronomy*, 11, 1873. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091873>
- Lopes, A. C. A., Eda, S. H., Andrade, R. P., Amorim, J. C. y Duarte, W. F. (2019). New alcoholic fermented beverages: potentials and challenges. En *Fermented Beverages* (pp. 577-603). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815271-3.00014-2>
- Ludena-Urquiza, F. E., García-Torres, S. M., Tolonen, T., Jaakkola, M., Pena-Niebuhr, M. G., Von Wright, A., Repo-Carrasco-Valencia, R., Korhonen, H. y Plumed-Ferrer, C. (2017). Development of a fermented quinoa-based beverage. *Food Science & Nutrition*, 5(3), 602-608. <https://doi.org/10.1002/fsn3.436>
- Mamhoud, A., Nionelli, L., Bouzaine, T., Hamdi, M., Gobbetti, M. y Rizzello, C. G. (2016). Selection of lactic acid bacteria isolated from Tunisian cereals and exploitation of the use as starters for sourdough fermentation. *International Journal of Food Microbiology*, 225, 9-19. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.03.004>
- Marcinek, K. y Krejpcio, Z. (2017). Chia seeds (*Salvia hispanica*): Health promoting properties and therapeutic applications - a review. *Roczniki Panstwowego Zakladu Higieny*, 68, 123-129.
- Martinez, J. R., De la Paz, S. M., Puerta, R. D. la, García-Giménez, M. D. y Fernández-Arche, M. Á. (2020). Characterization of bioactive compounds in defatted hempseed (*Cannabis sativa* L.) by UHPLC-HRMS/MS and anti-inflammatory activity in primary human monocytes. *Food & Function*, 11(5), 4057-4066. <https://doi.org/10.1039/D0FO00066C>

- Menezes, A. G. T., Ramos, C. L., Dias, D. R. y Schwan, R. F. (2018). Combination of probiotic yeast and lactic acid bacteria as starter culture to produce maize-based beverages. *Food Research International*, 111, 187-197. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.04.065>
- Montanuci, F., Pereira, S. y Pinzon, C. (2019). *Development of a Kefir added with chia and evaluation of its physical, chemical and sensory characteristics*. 20(1).
- Nagino, T., Kaga, C., Kano, M., Masuoka, N., Anbe, M., Moriyama, K., Maruyama, K., Nakamura, S., Shida, K. y Miyazaki, K. (2018). Effects of fermented soymilk with *Lactobacillus casei* Shirota on skin condition and the gut microbiota: A randomised clinical pilot trial. *Beneficial Microbes*, 9(2), 209-218. <https://doi.org/10.3920/BM2017.0091>
- Narzary, Y., Brahma, J., Brahma, C. y Das, S. (2016). A study on indigenous fermented foods and beverages of Kokrajhar, Assam, India. *Journal of Ethnic Foods*, 3(4), 284-291. <https://doi.org/10.1016/j.jef.2016.11.010>
- Nissen, Demircan, Taneyo-Saa y Gianotti. (2019). Shift of aromatic profile in probiotic hemp drink formulations: a metabolomic approach. *Microorganisms*, 7(11), 509. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7110509>
- Nissen, L., di Carlo, E. y Gianotti, A. (2020). Prebiotic potential of hemp blended drinks fermented by probiotics. *Food Research International*, 131, 109029. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109029>
- Paredes-Lopez, O. (2018). *Amaranth Biology, Chemistry, and Technology*. CRC Press.
- Patterson, E., Wall, R., Fitzgerald, G. F., Ross, R. P. y Stanton, C. (2012). Health implications of high dietary Omega-6 polyunsaturated fatty acids. *Journal of Nutrition and Metabolism*, 2012, e539426. <https://doi.org/10.1155/2012/539426>
- Ray, R. C. y Joshi, V. K. (2014). Fermented foods: past, present and future. En *Microorganisms and Fermentation of Traditional Foods*. CRC Press.
- Russo, R. y Reggiani, R. (2013). Variability in Antinutritional Compounds in Hempseed Meal of Italian and French Varieties. *Plant*, 1, 25-29. <https://doi.org/10.11648/j.plant.20130102.13>
- Sabikhi, L. y Sathish Kumar, M. H. (2012). Fatty acid profile of unconventional oilseeds. *Advances in Food and Nutrition Research*, 67, 141-184. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394598-3.00004-6>
- Sánchez, M. T., Ruiz, M. A. y Morales, M. E. (2015). Microorganismos probióticos y salud. *Ars Pharmaceutica (Internet)*, 56(1), 45-59. <https://doi.org/10.4321/S2340-98942015000100007>
- Santos, C. C. A. do A., Libeck, B. da S. y Schwan, R. F. (2014). Co-culture fermentation of peanut-soy milk for the development of a novel functional beverage. *International Journal of Food Microbiology*, 186, 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.06.011>
- Steinkraus, K. (1992). Lactic acid fermentations. En *Applications of Biotechnology to Fermented Foods: Report of an Ad Hoc Panel of the Board on Science and Technology for International Development*. National Academies Press (US). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK234703/>
- Szparaga, A., Tabor, S., Kocira, S., Czerwińska, E., Kuboń, M., Płóciennik, B. y Findura, P. (2019). Survivability of Probiotic bacteria in model systems of non-fermented and fermented coconut and hemp milks. *Sustainability*, 11(21), 6093. <https://doi.org/10.3390/su11216093>
- Tripathi, M. K. y Giri, S. K. (2014). Probiotic functional foods: Survival of probiotics during processing and storage. *Journal of Functional Foods*, 9, 225-241. <https://doi.org/10.1016/j.jfff.2014.04.030>
- Valero-Cases, E., Cerdá-Bernad, D., Pastor, J. J. y Frutos, M. J. (2020). Non-dairy fermented beverages as potential carriers to ensure probiotics, prebiotics, and bioactive compounds arrival to the gut and their health benefits. *Nutrients*, 12(6), 1666. <https://doi.org/10.3390/nu12061666>
- Venskutonis, P. R. 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. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12021>
- Wang, Y. H., Upadhyaya, H. D. y Kole, C. (2014). *Genetics, genomics and breeding of sorghum*. CRC Press.
- World Health Organization Food Safety. (1996). *Fermentation: Assessment and research*. Report of a Joint FAO/WHO. 11-15. Diciembre de 1995 (WHO/FNU/FOS/96.1). World Health Organization y Department of Health, Republic of South Africa. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/63158>
- Zambrano-Muñoz, Y. D. (2016). *Evaluación de una bebida «Yogurt» a base de (Salvia hispanica L., Phalaris canariensis L.), hortalizas (Medicago sativa L., Nasturtium officinale R.), diferentes edulcorantes, y su efecto en el contenido proteico*. <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/1826>
- Zerbielli, K. M. (2014). *Bebida láctea fermentada com cultura probiótica adicionada de semente de chia (Salvia hispanica L.)*. <http://repositorio.ufpr.edu.br/8080/jspui/handle/1/1060>
- Zhao, M., Zhang, F., Zhang, L., Liu, B. y Meng, X. (2019). Mixed fermentation of jujube juice (*Ziziphus jujuba* Mill.) with *L. rhamnosus* GG and *L. plantarum*-1: Effects on the quality and stability. *International Journal of Food Science & Technology*, 54(8), 2624-2631. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14174>



Proteínas de leguminosas modificadas químicamente: estructura, funcionalidad y su aplicación en alimentos

L. Rosas-Ordoñez* y D. K. Baigts-Allende

*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos
Correo electrónico: lizabeth.rosasoz@udlap.mx

RESUMEN

La funcionalidad de las proteínas como ingrediente emulgente, espumante, gelificante, entre otras características, ha permitido el desarrollo de productos alimenticios. Debido a cambios en hábitos alimentarios de los sectores poblacionales, como es el caso del veganismo, existe un creciente uso de proteínas vegetales, principalmente las de leguminosas. Una de las desventajas de estas proteínas es su limitada tecnofuncionalidad en comparación con las de origen animal. Una alternativa de mejora es la modificación de su estructura química, por medio de métodos como la acilación, desamidación, fosforilación, tiolación, glicosilación y el cambio de pH. Las ventajas que presentan algunos de estos métodos es que no requieren la adición de agentes externos, en otros, se usan reactivos seguros, además, tienen una alta eficiencia y bajos costos de implementación. El presente artículo de revisión aborda el uso de las proteínas de leguminosas modificadas químicamente y su efecto en las propiedades tecno-funcionales y aplicación en la formulación de alimentos.

Palabras clave: leguminosas, proteínas, modificación química, propiedades funcionales.

ABSTRACT

The protein functionality as emulsifying, foaming, gelling ingredient, among others has led to the development of food products. Because of an increase in population habits like veganism, an increase in the use of vegetal proteins is present, mainly legumes. A disadvantage of these proteins is their limited techno-functionality compared to those of animal origin. An improvement alternative is the modification of their chemical structure with methods like acylation, deamidation, phosphorylation, thiolation, glycosylation, and pH shift. They present advantages, such as the fact that they do not require the addition of reagents, the use of safe reagents, high efficiency, and low implementation costs. This review article addresses the use of chemically modified legume proteins and their effect on techno-functional properties and application in food formulation.

Keywords: legumes, proteins, chemical modification, functional properties.

INTRODUCCIÓN

Las leguminosas representan una familia extensa de cultivos que producen semillas y que son consumidas por el ser humano. El empleo de las leguminosas para la alimentación está relacionado con distintos beneficios, como su capacidad para fijar el nitrógeno en el suelo, actividad prebiótica y antioxidante, disminución del riesgo a desarrollar diabetes tipo 2, disminución de la presión arterial, entre otros. Además, son una buena fuente de nutrientes para el organismo, principalmente de proteínas e hidratos de carbono complejos, también aportan ácidos grasos insaturados como la vitamina E y minerales (De Angelis *et al.*, 2021). Sus semillas han demostrado ser una fuente accesible y sustentable para la alimentación de la población mundial. Además, las preferencias de los consumidores actuales se han centrado en el cambio de alimentos de origen animal por los formulados con ingredientes de origen vegetal, debido a su preocupación por el sufrimiento y maltrato animal o por un interés en minimizar el impacto ambiental (Olmedilla-Alonso *et al.*, 2010).

Debido al alto contenido de proteína que presentan las leguminosas comparadas con otras fuentes vegetales, diversas investigaciones se han enfocado en la obtención y empleo de aislados proteicos. Además de su valor nutricional, estas son empleadas en el desarrollo de sistemas alimenticios, debido a que poseen propiedades tecno-funcionales como agentes emulgentes, formación de geles, incremento de la viscosidad, estabilización de sistemas, entre otros (Klost y Drusch, 2019; Rodríguez-Canto *et al.*, 2019).

Sin embargo, se ha encontrado que las proteínas vegetales presentan ciertas desventajas en comparación con las proteínas de origen animal. Entre sus limitaciones se encuentran una menor solubilidad acuosa, alta inestabilidad al cambio de pH, cambios significativos en su conformación por efecto de la fuerza iónica, modificación de la temperatura del medio, así como la presencia de sustancias antinutricionales, alérgenos o sabores desagradables. Es por ello que los trabajos de investigación han optado por la modificación de estas moléculas (Nikbakht-Nasrabadi *et al.*, 2021).

La modificación de proteínas es un proceso por el que de forma intencional se cambia su estructura molecular y carga. Los

procesos pueden realizarse mediante técnicas físicas, químicas o enzimáticas. Las modificaciones químicas han sido empleadas durante varios años por su bajo costo de implementación, fácil ejecución y alta eficiencia. En esta clasificación se engloban reacciones como la acilación, desaminación, fosforilación, tiolación, glicosilación y cambios de pH. Anteriormente, se ha mostrado que las modificaciones químicas se utilizan para diversificar el uso de proteínas de soya, chícharo, garbanzo, frijol, lenteja, entre otras especies de leguminosas (Nikbakht-Nasrabadi *et al.*, 2021).

El presente trabajo de revisión muestra el efecto estructural, fisicoquímico y funcional de las modificaciones químicas en diferentes proteínas de leguminosas para el desarrollo de productos alimenticios. Además, se describen las ventajas y desventajas del uso de cada tipo de modificación.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. Proteínas de leguminosas

El uso de proteínas de origen vegetal siempre ha estado presente en la dieta humana. Sin embargo, actualmente se ha dado un incremento en su uso debido a que su cultivo es más abundante y relativamente económico en comparación con las proteínas de origen animal. Se estima que al consumir proteínas de origen vegetal se reduce hasta cien veces el consumo de agua en comparación al consumo de proteínas de origen animal. Como efecto de la explotación demográfica, las proteínas vegetales representan un reto para su uso y para la exploración de nuevas fuentes que permitan cumplir con las necesidades de la población. En la mayoría de los casos estas proteínas se obtienen de granos y semillas. En este contexto, las leguminosas representan un importante grupo de plantas de las cuales pueden aislarse proteínas vegetales (Day, 2013; Stone *et al.*, 2019).

Las leguminosas pertenecen a la familia *Fabaceae* (*Leguminosae*) que incluye árboles, arbustos y hierbas. Se caracterizan por la generación anual de vainas que contienen entre una y doce semillas; estas pueden presentar distintos colores, tamaños y formas, y se distinguen por la presencia de dos cotiledones (Didinger y Thompson, 2021).

Las semillas de leguminosas presentan un bajo contenido de lípidos y una buena cantidad de fibra dietética. Actualmente, las principales leguminosas de las cuales se obtienen proteínas vegetales son la soya, chícharo, garbanzo, lenteja, habas, frijoles y otras 150 especies comestibles de la familia (Olmedilla-Alonso *et al.*, 2010).

1.1. Estructura

Las leguminosas se caracterizan por presentar una mayor fracción de proteínas de almacenamiento conocidas como 11 S (legúmina o glicinina) y 7 S (vicilina o β -coglicina), estas proteínas son un tipo de globulina (figura 1). Ambas fracciones son capaces de formar estructuras cuaternarias (Schwenke, 2001). La 11 S tiene una estructura química en forma de hexámero conformado por unidades que interaccionan de forma no-covalente. Estas unidades a su vez están formadas por dos subunidades que se unen mediante puentes disulfuro. Una de las subunidades

puede encontrarse en bibliografía bajo el nombre de legúmina α , subunidad ácida o subunidad grande; se caracteriza por un peso de alrededor de 40 kDa. Mientras que la otra unidad se conoce como legúmina β , subunidad básica o subunidad chica, y pesa alrededor de 20 kDa (Jarpa-Parra *et al.*, 2014).

En el caso de la vicilina, su estructura es la de un trímero (Schwenke, 2001). Se ha reportado que este grupo de proteínas son deficientes en metionina y cisteína, lo que limita su capacidad para formar puentes disulfuro. El peso de sus subunidades se encuentra alrededor de los 30-80 kDa (Barac *et al.*, 2015).

Otra fracción proteica de las leguminosas son las lectinas. Estas son proteínas unidas a carbohidratos, que presentan una estructura de sándwich entre láminas β ; condición que ocasiona un ordenamiento extremadamente apretado. Esto permite que estas moléculas sean altamente estables tanto a tratamientos térmicos como a los procesos de digestión (Carbonaro *et al.*, 2015; Lagarda-Diaz *et al.*, 2017).

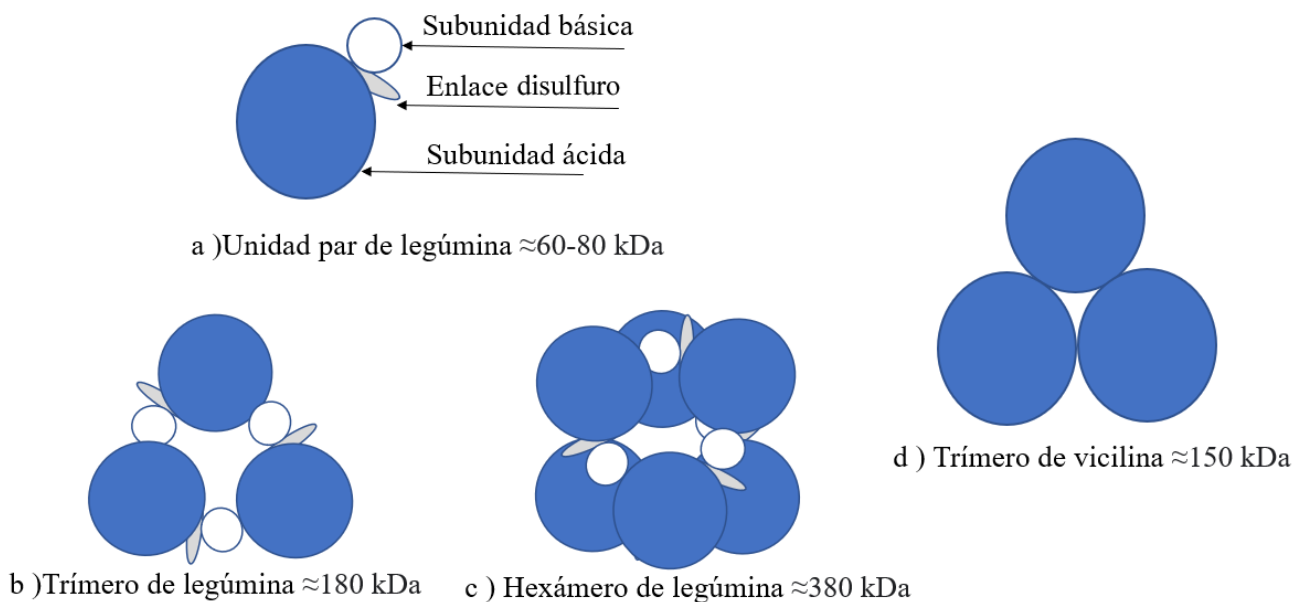


Figura 1.

Representación de la estructura cuaternaria de la legúmina y vicilina. Adaptada de Barac *et al.*, 2015.

1.2. Composición química

Para distintas especies de leguminosas se ha reportado que la legúmina está presente entre un 18 % y un 25 % del total, mientras la vicilina representa entre un 55 % y un 80 % (Aluko *et al.*, 2015; Stone *et al.*, 2019). Es posible encontrar entre un 10 % y 30 % de albúminas en las proteínas de leguminosas. Estas generalmente están conformadas por dos cadenas polipeptídicas que pesan de 1 a 9 kDa. Se caracterizan por su unión mediante enlaces disulfuro, por lo que se les ha relacionado con más del 50 % del total del azufre presente en las proteínas de leguminosas (Day, 2013).

1.3. Propiedades tecno-funcionales y térmicas

Las particularidades de la estructura y composición química de la legúmina y vicilina propician que sus propiedades funcionales sean distintas. Dada la presencia de puentes disulfuro que estabilizan la estructura cuaternaria de la legúmina, este grupo de proteínas tiene la capacidad de formar geles con firmeza y elasticidad diferentes a los que se obtienen con la vicilina. Mientras que la vicilina se caracteriza por propiciar interacciones hidrofóbicas y puentes de hidrógeno (Day, 2013). Se ha reportado que la legúmina tiene una menor capacidad espumante y baja solubilidad (Cui *et al.*, 2020).

Asimismo, las propiedades térmicas de la vicilina y legúmina también son distintas. La primera presenta menores temperaturas de desnaturalización, lo que se debe a que la legúmina tiene una estructura más compacta estabilizada por los puentes disulfuro; esto incrementa su termorresistencia (Lafarga *et al.*, 2019). Elevadas temperaturas de desnaturalización se relacionan con un alto contenido de láminas β que estabiliza la estructura (Carbonaro *et al.*, 2015).

Por otro lado, en la vicilina las temperaturas de desnaturalización se han reportado entre 79.9 y 27 °C en distintas especies de leguminosas; mientras que para la legúmina se han encontrado entre 95.5 y 215 °C (la variación se debe al contenido de minerales, la humedad y la especie vegetal) (Ghribi *et al.*, 2015). Debido a que esta termorresistencia se relaciona con una conformación compacta de la legúmina y la vicilina es que, junto a otras proteínas vegetales, han sido clasificadas dentro de los alérgenos de origen vegetal, dado que son difíciles de digerir (Pauli, 2011). Pero a su vez, esa misma resistencia permite que

una fracción de las proteínas pueda mantenerse estable incluso durante el proceso de digestión. Esta particularidad se ha relacionado con un efecto benéfico de actividad protectora y de antiproliferación de cáncer en el colon (Carbonaro *et al.*, 2015).

1.4. Propiedades nutraceuticas y antimicrobianas

Varias proteínas de leguminosas presentan propiedades nutraceuticas. Las 7S se han relacionado con la reducción del colesterol y triglicéridos, mientras que las 11S se han descrito con actividad para bajar la presión arterial (Carbonaro *et al.*, 2015). Las lectinas han sido sugeridas como agentes terapéuticos para tratar la pancreatitis aguda. Además, han demostrado poseer una actividad antimicrobiana y antifúngica, como un método de defensa de las plantas contra especies fúngicas de *Fusarium*, *Colletotricum*, *Candida*, *Aspergillus*, *Trichoderma* y bacterias como *Bacillus subtilis*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Klebsiella* sp., *Staphylococcus aureus* y *Streptococcus* sp. (Carbonaro *et al.*, 2015; Lagarda-Díaz *et al.*, 2017).

Todas las características que se describen para las proteínas de leguminosas pueden verse afectadas por las modulaciones intencionales a las que se sometan. Eso implica cambios en la conformación, composición, propiedades fisicoquímicas y tecno-funcionales.

2. Cambios en las propiedades funcionales de las proteínas por efecto de la modificación

Las propiedades tecno-funcionales de las proteínas permiten que puedan ser empleadas para la formulación de alimentos. Estas características fisicoquímicas afectan la interacción de estos biopolímeros con otros componentes tales como otras proteínas, carbohidratos, lípidos, gases, minerales, compuestos volátiles y agua (Day, 2013). La modificación de estas interacciones tiene lugar durante las etapas de procesamiento, almacenamiento, distribución y consumo de un alimento. Estas características tecno-funcionales comprenden una gran cantidad de propiedades.

Kinsella y Melachouris (1976) subdividen las propiedades tecno-funcionales en:

- a) Organolépticas, que incluyen el color, sabor, olor, textura y la sensación en la boca.

- b) Cinéticas, como la turbidez, suavidad o aspereza.
- c) De hidratación, como solubilidad, dispersabilidad, humectabilidad, absorción de agua, hinchazón, espesamiento, gelificación, retención de agua, etc.
- d) De superficie, como la formación de espuma, capacidad de formar emulsiones, formación de películas y unión con otros compuestos.
- e) Propiedades estructurales, como la cohesión, elasticidad, aspereza y masticabilidad.
- f) Propiedades de textura, que incluyen viscosidad, adhesión y reticulación cruzada.
- g) Propiedades de reología, como formación de masa, texturizabilidad, formación de fibras, agregación, pegajosidad, gelificación, etc.
- h) Otras propiedades, como la compatibilidad con aditivos, enzimas, etc.

La caracterización de estas propiedades en las proteínas modificadas permite evaluar el efecto y eficacia de algún método químico, físico o enzimático que module la estructura de la proteína y, por ende, afecte sus propiedades tecno-funcionales, lo que permite aplicarla en productos alimenticios específicos.

A pesar de que las proteínas animales han sido usadas por décadas debido a sus excelentes propiedades tecno-funcionales en el desarrollo de productos alimenticios, la introducción de nuevas fuentes proteicas ha llevado a la necesidad de su caracterización y optimización. En el caso de las proteínas vegetales, se ha estudiado la modificación de su estructura con la finalidad de mejorar sus propiedades en el sistema alimenticio o dirigirla mediante la modificación de sus grupos funcionales (Basak y Singhal, 2022).

2.1. Fosforilación

La fosforilación es una reacción que permite introducir un grupo fosfato a la cadena peptídica (Nikbakht-Nasrabadi *et al.*, 2021).

La reacción puede llevarse a cabo con los residuos de aminoácidos que presentan grupos alquilo, anhídridos de ácido e hidroxilo de arilo (figura 2) (Hu *et al.*, 2019). Al introducir grupos fosfato a la proteína se incrementa la carga neta negativa y la repulsión proteína-proteína (Nikbakht-Nasrabadi *et al.*, 2021). Para este método se utiliza el trimetafosfato de sodio (STMP por sus siglas en inglés), considerado como un aditivo seguro (GRAS) (Akharume *et al.*, 2021), el tripolifosfato de sodio (STP por sus siglas en inglés) y el oxiclorigenato de fósforo (POCl_3) (Akharume *et al.*, 2021).

Este método fue empleado por Lui *et al.* (2020) para la modificación de la proteína de chícharo, donde se vio un incremento en elementos de la estructura secundaria como las láminas β (de $24.59\% \pm 1.13\%$ a $28.08\% \pm 0.45\%$) y α -hélice (de $10.43\% \pm 0.18\%$ a $14.84\% \pm 0.32\%$). Este cambio estructural se ha relacionado con un incremento en la temperatura (de 77.30 a 78.67°C) y entalpía de desnaturalización (de 107.67 a 150.49 J g^{-1}), debido a que se presenta un mayor ordenamiento de la estructura, incrementando la actividad y la estabilidad emulgente (63.07% y 69.08% , respectivamente), la actividad espumante (114.28%) y la capacidad de ligar aceite (73.31%).

Por otro lado, se ha sugerido que la fosforilación puede afectar los enlaces disulfuro que estabilizan la estructura terciaria y cuaternaria de la proteína hasta provocar la desintegración de la estructura globular, como se evidenció en el estudio de Lui *et al.* (2020) sobre proteína de chícharo. Aunque esta tendencia no es necesariamente la misma en todas las proteínas. En el caso de la fosforilación de proteína de soya, se ha visto que conforme se incrementa el grado de sustitución, aumenta el peso molecular de la proteína por la formación de enlaces entre subunidades de la estructura cuaternaria.

La fosforilación también se ha relacionado con una disminución de aminoácidos expuestos y un efecto significativo en la hidrofobicidad superficial del aislado proteico de soya. Esto se debe a que la presencia de PO_4^{3-} afecta la carga superficial de la proteína y cómo esta interactúa con el agua y otras proteínas (Liu *et al.*, 2021). En el caso de la proteína de frijol de mungo sometido a este método, se observó una disminución de 2.2% de las α -hélice y de 4.7% de las láminas β , lo que resultó en un incremento de los giros β (de 40.9% a 48.1%) (Hadidi *et al.*, 2021). Lo anterior demuestra que al efectuar no solo este método de

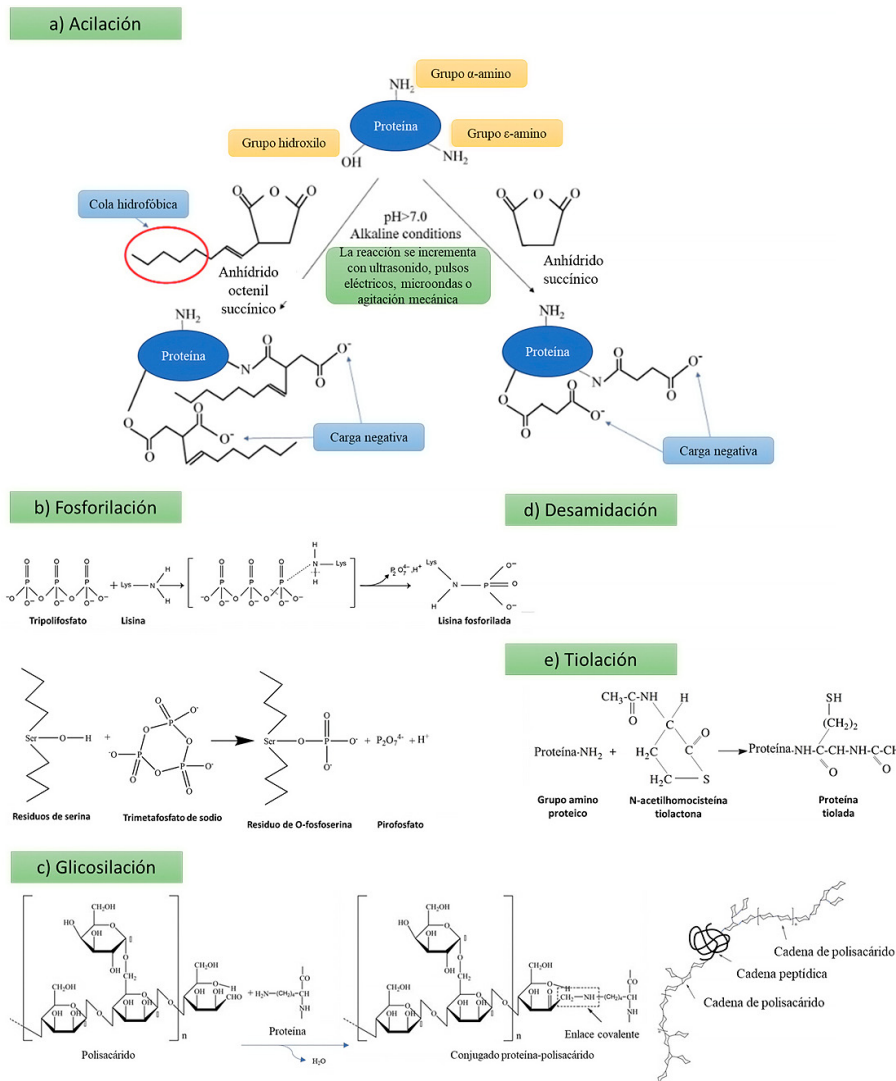


Figura 2.

Cambios químicos en las proteínas.

modificación, sino cualquier otro, es necesario realizar la caracterización de los cambios estructurales de las proteínas. Y es recomendable correlacionar el método y los cambios estructurales en los diferentes niveles de la configuración de la proteína (secundaria, terciaria y cuaternaria) para corroborar si estos cambios afectan significativamente las propiedades tecno-funcionales.

2.2. Acilación

La acilación ha demostrado ser una reacción exitosa en la modificación química de proteínas de leguminosas. Esta permite la sustitución de aquellos grupos amino con carga positiva por un residuo neutro, lo que se conoce como acetilación; o la sustitución en los grupos amino cargados negativamente como el

grupo succinilo en la succinilación, un grupo maleilo en la maleilación y un grupo citraconilo en la citraconilación (Schwenke, 2001). La reacción puede ocurrir en todos los grupos nucleofílicos de los residuos de aminoácidos, pero la mayor afinidad se encuentra en el grupo ε-amino de la lisina (Nikbakht-Nasrabadi *et al.*, 2021). La succinilación es un proceso relativamente sencillo y fácilmente escalable.

Con el método de succinilación se propicia una disociación gradual de la estructura cuaternaria de las proteínas y un despliegue parcial de la cadena peptídica. Este fenómeno se logra con mayor eficiencia cuando entre el 85 % y 95 % de los grupos amino son acetilados, y la consecuente succinilación de los gru-

pos OH incrementa la repulsión electrostática de las cadenas. La separación de las subunidades expone a otros grupos de aminoácidos y modifica la hidrofobicidad de superficie, lo que afecta a las propiedades interfaciales (Schwenke, 2001). La diferencia en la solubilidad se debe a que en la succinilación se introducen cadenas polares más largas, generando un mayor cambio de la conformación y repulsión de la proteína. Otra investigación demostró que la succinilación de la proteína de haba afectó tanto la viscosidad como la hidrofobicidad de superficie, presentando cambios en sus propiedades interfaciales (actividad y estabilidad espumante y capacidad de formación de emulsiones en la tabla I) (Krause *et al.*, 1997; Schwenke *et al.*, 1998).

Tabla I. Propiedades tecno-funcionales de proteínas de leguminosas modificadas químicamente

Fuente vegetal	Método	Absorción de agua	Absorción de aceite	Actividad emulgente	Estabilidad emulgente	Capacidad espumante ⁶	Estabilidad espumante	Referencia
<i>Lathyrus clymenum</i> Chícharo	N/A	2.44 ± 0.17 ¹	3.31 ± 0.119 ²	25.0 ± 0.0 ⁵	N/D	N/D	N/D	Pastor-Cavada <i>et al.</i> (2010)
	N/A	3.93 ± 0.53 ¹	2.96 ± 1.23 ²	85.24 ± 5.88 ⁶	51.74 ± 12.07 ⁸	50 ± 7.14	0 ⁸	Liu <i>et al.</i> (2020)
	Fosforilación	2.22 ± 0.08 ¹	5.13 ± 1.34 ²	139.87 ± 6.18 ⁶	87.48 ± 2.42 ⁸	107.14 ± 7.14	22.14 ± 2.58 ⁸	
Chícharo (Vicilina)	No modificado	N/D	N/D	85 ± 3 ⁶	N/D	N/D	120 ± 1 ⁹	Pedrosa (1997)
	Glicosilación con lactosa	N/D	N/D	142 ± 7 ⁶	N/D	N/D	43 ± 3 ⁹	
	Glicosilación con glucosa	N/D	N/D	68 ± 3 ⁶	N/D	N/D	85 ± 1 ⁹	
	Glicosilación con galactosa	N/D	N/D	157 ± 3 ⁶	N/D	N/D	53 ± 2 ⁹	
Garbanzo (agua de cocción)	Modificación de pH 3.5	N/D	N/D	15.7 ± 0.0 ⁸	0.0 ± 0.0 ⁸	294 ± 1	78.3 ± 1.7 ⁸	Lafarga <i>et al.</i> (2019)
	Modificación de pH 5	N/D	N/D	55.6 ± 0.6 ⁸	40.2 ± 0.9 ⁸	264 ± 6	56.8 ± 3.2 ⁸	
	Modificación de pH 6.5	N/D	N/D	3.9 ± 0.0 ⁸	0.0 ± 0.0 ⁸	175 ± 7	3.4 ± 3.1 ⁸	

Tabla I. Propiedades tecno-funcionales de proteínas de leguminosas modificadas químicamente (continuación)

Fuente vegetal	Método	Absorción de agua	Absorción de aceite	Actividad emulgente	Estabilidad emulgente	Capacidad espumante ⁶	Estabilidad espumante	Referencia
Frijol mungo	No modificado	2.15 ¹	1.4 ²	65 ⁸	15 ⁸	110	N/D	El-Adawy (2000)
	Acetilación	2.50-2.60 ¹	1.60-1.65 ²	36-65 ⁸	16-23 ⁸	120-135	N/D	
	Succinilación	2.40-2.45 ¹	1.45-1.55 ²	14-62 ⁸	16-21 ⁸	125-130	N/D	
Frijol mungo	Succinilación	N/D	N/D	25-33 ⁶	28-33 ⁹	N/D	N/D	Charoensuk <i>et al.</i> (2018)
Lenteja	Modificación de pH 8-pH 9	N/D	N/D	N/D	N/D	550-560	81-78 ⁸	Jarpa-Parra <i>et al.</i> (2014)
Lenteja (globulina)	No modificada	1.1 ³	2.6 ⁴	54.1 ⁸	52.2 ⁸	85-87	37-77 ⁸	Singh-Bora (2002)
	Succinilación con 57.9 % de lisina sustituida	2.3 ³	2 ⁴	60 ⁸	57.9 ⁸	85-89	16-30 ⁸	
	Succinilación con 78.6 % de lisina sustituida	2.3 ³	2.2 ⁴	62.2 ⁸	58.8 ⁸	80-87.5	11-56 ⁸	
	Succinilación con 87.2 % de lisina sustituida	2.2 ³	2.2 ⁴	62.8 ⁸	57.5 ⁸	74.5-53	12-54 ⁸	
	Succinilación con 90.3 % de lisina sustituida	2.3 ³	2.2 ⁴	60.6 ⁸	54.4 ⁸	78-87	11-34 ⁸	
Chícharo	No modificada	1.28 ± 0.01 ¹	2.98 ± 0.22 ²	N/D	22 ⁹	15	4.33 ⁸	Shah <i>et al.</i> (2019)
	Succinilación con anhídrido succínico	1.04 ± 0.01 ¹	6.16 ± 0.09 ²	N/D	13 ⁹	32	27.59 ⁸	
	Succinilación con anhídrido octenil succínico	1.11 ± 0.03 ¹	2.69 ± 0.06 ²	N/D	5 ⁹	38	13.79 ⁸	

Tabla I. Propiedades tecno-funcionales de proteínas de leguminosas modificadas químicamente (continuación)

Fuente vegetal	Método	Absorción de agua	Absorción de aceite	Actividad emulgente	Estabilidad emulgente	Capacidad espumante ⁶	Estabilidad espumante	Referencia
Chicharo	Succinilación con anhídrido dodecenil succínico	1.00 ± 0.01 ¹	4.41 ± 0.16 ²	N/D	29 ⁹	40	26.67 ⁸	Shah <i>et al.</i> (2019)
Soya	Glicosilación/ glucosa por 2-4 h	N/D	N/D	0.49 - 0.58 ⁷	19.8-21.8 ⁹	47-54	9-16 ⁸	Li <i>et al.</i> (2019)
	Glicosilación/ glucosa por 5 h	N/D	N/D	0.68 ⁷	23.2 ⁹	55	16.5 ⁸	
	Glicosilación/ glucosa por 6 h	N/D	N/D	0.59 ⁷	22.5 ⁹	51	9.6 ⁸	
Soya	Cambio de pH en combinación con presión hidrostática	N/D	N/D	12.70-29.57 ⁶	21.32-35.06 ⁹	N/D	N/D	Tan <i>et al.</i> (2021)
Soya	No modificada	N/D	N/D	19.01-27 ⁶	13.14-16.30 ⁹	15-43.33	51.61-65.93 ⁸	Fu <i>et al.</i> (2021)
	Glicosilación con lactosa	N/D	N/D	43.53-98.87 ⁶	13.24-35.38 ⁹	30.67-79	61.87-87 ⁸	

(N/D) no determinado, gramos de agua absorbidos por g de muestra¹, gramos de grasa absorbidos por g de muestra², ml de agua por gramo de proteína³, ml de aceite por gramo de proteína⁴, porcentaje de grasa emulsionada en peso⁵, m² de grasa por gramo de proteína⁶, unidades de absorbancia⁷, porcentaje⁸, min⁹.

Los cambios mencionados pueden estar relacionados con modificaciones en la estructura secundaria de la proteína, como se demostró en el estudio de Shah *et al.* (2019). En dicha investigación, la succinilación aplicada en proteína de chícharo evidenció cambios importantes en los residuos de lisina, disminución de láminas β de 5.87 % a 2.74 %, 2.60 % y 1.50 %, al modificarse con anhídrido succínico (SA por sus siglas en inglés), anhídrido octenil succínico (OSA por sus siglas en inglés) y anhídrido dodecenil succínico (DDSA por sus siglas en inglés), respectivamente, cambios

de α-hélice (de 26.23 % a 19.64 %, 26.54 % y 16.15 %, al modificarse con SA, OSA y DDSA, respectivamente) y mayor presencia de láminas β antiparalelas (de 23.00 % a 27.50 %, 25.15 % y 27.60 %, al modificarse con SA, OSA y DDSA, respectivamente). Estos cambios conformacionales y la adición de los grupos con carga modifican la carga neta de la proteína, favoreciendo la formación de aglomerados. Además, las láminas β antiparalelas son más estables por un mayor número de puentes de hidrógeno que las paralelas. Ello hace más ordenada y compacta a la

proteína de chícharo, incrementando su temperatura de desnaturalización (de 64.13 °C a 65.67 °C, 65.37 °C y 73.15 °C cuando se emplea SA, OSA o DDSA, respectivamente), y modificando la entalpía de distinta forma dependiendo del reactivo utilizado (para la proteína sin modificar fue de 2.45 J/g, para la proteína modificada con SA de 2.26 J/g, con OSA de 3.43 J/g y con DDSA de 2.18 J/g).

Por otro lado, El-Adawy (2000) demostró que propiedades como la absorción de agua/aceite, formación de espuma y estabilidad espumante se ven favorecidas con la acetilación más que con la succinilación (tabla I). Esto debido a la incorporación de cargas negativas que despliegan y exponen residuos de aminoácidos hidrofóbicos de la proteína. Además, tanto la succinilación como la acetilación demostraron incrementar un 5 % la digestibilidad de la proteína de frijol de mungo, debido a que durante el proceso de modificación se disminuye la presencia de factores antinutricionales, como taninos e inhibidores de tripsina.

En el caso de la acetilación, esta reacción propicia la aglomeración de las subunidades, lo que se conoce como oligomerización. Esto se debe a un incremento de la hidrofobicidad de los monómeros, lo que favorece su unión mediante interacciones hidrofobas (Schwenke, 2001). Uno de los aminoácidos más susceptibles a la reacción de acetilación es la lisina; cuando se logra una modificación de 70 % a un 90 %, es posible obtener un incremento de la solubilidad (hasta un 25 %), así como de la capacidad de ligar agua/aceite (hasta un 15 %), la actividad y estabilidad espumante y capacidad de formación de emulsión (hasta un 48 % en la menor concentración del reactivo) (tabla I) (El-Adawy, 2000).

Las investigaciones mencionadas demuestran que el reactivo empleado, así como su concentración, tienen un efecto favorable en las propiedades funcionales y nutricionales. Pero un excesivo grado de modificación de los residuos de aminoácidos puede causar una disminución de las propiedades deseadas.

2.3. Método de glicosilación

Esta modificación también es conocida como glicación. El método es considerado de grado alimenticio porque usualmente no se requiere incorporar reactivos químicos diferentes a los azúcares

(Nikbakht-Nasrabadi *et al.*, 2021). La reacción consiste en la conjugación de un azúcar reductor que genera un enlace covalente con un grupo amino libre, ya sea de un aminoácido, un péptido o una proteína, mediante un calentamiento controlado en presencia de agua (figura 2) (Nikbakht-Nasrabadi *et al.*, 2021).

La glucosilación es una de las técnicas de modificación química más empleada (por su grado alimentario), en especial con la proteína de soya. Esto es porque esta proteína es una de las fuentes comerciales de leguminosas más exploradas y empleadas alrededor del mundo. En la glucosilación de proteína de soya con glucosa se ha observado que al incrementar el tiempo de la reacción se genera un desplegamiento de la proteína. Lo anterior resulta en un cambio de estructura secundaria, debido a que se afectan las interacciones de puentes de hidrógeno que estabilizan las α -hélice, y a su vez produce un reacomodo de la estructura secundaria de láminas β , giros β , disminución de α -hélice de 26.34 % a 15.53 %, y un aumento de espirales al azar de 15.45 % hasta 28.36 % (Li *et al.*, 2019).

Es importante considerar que el despliegue de una parte de la cadena peptídica le permite una mayor flexibilidad para acomodarse en las interfaces de espumas o emulsiones. Lo anterior es la principal justificación para los cambios en las propiedades tecno-funcionales que se observaron en el estudio de Li *et al.* (2019); en el caso de la capacidad y estabilidad espumante, se observó un incremento de 44.9 % a 55.8 % y de 42 a 67 %, respectivamente; además, aumentó un 74 % de la actividad emulgente y un 118 % de la estabilidad espumante (tabla I). En el estudio de Fu *et al.* (2021) de glucosilación de la proteína de soya con lactosa se reportó un cambio en el arreglo estructural de la cadena peptídica; lo que dio como resultado una disminución de las α -hélice de 11.65 % a 9.9 % y láminas β pasando de 39.16 % a 32.41 %, mientras que se incrementaron las espirales al azar de 37.65 % a 39.89 % y los giros β de 11.52 % a 17.70 %. Ambas investigaciones demuestran que la glucosilación en proteína de soya produce la apertura tanto de las α -hélice como de las láminas β , lo que causa un aumento en la flexibilidad y la exposición de los grupos sulfhidrilo y de los residuos de aminoácidos hidrofóbicos que de forma nativa se encuentran en el interior de la

cadena peptídica; como consecuencia, se puede producir el desacoplamiento de las subunidades de las globulinas características de las leguminosas.

Fu *et al.* (2021) reportaron que los cambios en la flexibilidad de la proteína se relacionan con un incremento de un 128 % de la actividad emulgente con 2 mg de proteína de soya/mL de solución y un 258 % en la actividad espumante a una concentración de 10 mg de proteína de soya/mL de solución; así como un incremento del 70 % en la estabilidad emulgente y 58 % para la estabilidad de la espuma (tabla I).

Es preciso señalar que el grado de modificación dependerá del peso molecular y el tipo de azúcar reductor empleado en esta reacción. Como se demostró en la investigación de Liu *et al.* (2021) sobre la solubilidad de la proteína de soya (tabla I) glucosilada con distintos azúcares (D-alulosa, glucosa y fructosa), donde tanto el tipo de azúcar como el pH la afectaron. Es por ello que en pH neutro la proteína de soya glucosilada con fructosa presentó la mayor solubilidad, mientras que en pH alcalino la D-alulosa favoreció la solubilización. Los azúcares que presenten una mayor masa molecular incrementan el impedimento estérico, lo que disminuye su grado de glucosilación de las proteínas.

Estos estudios (Fu *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2019) demuestran las posibilidades de investigación donde se utilicen otros azúcares como dextrinas o galactomananos para valorar su efecto no solo en propiedades de superficie, sino en otras como la formación de geles, la incorporación de sustancias relacionadas con el sabor o el aroma e incluso el mejoramiento de la estabilidad de compuestos bioactivos o probióticos.

2.4. Cambio de pH

Desde hace décadas, se ha reportado que el cambio de pH del medio afecta la solubilización de las proteínas, debido a cambios en la carga neta, lo cual puede modificar la estructura y las interacciones proteína-proteína y proteína-medio. En condiciones de pH extremadamente básicos y ácidos, las proteínas son desnaturadas al grado de exponer sus grupos sulfhidrilo y cadenas hidrofóbicas. Entre los reactivos empleados para alcanzar los pH básicos se encuentran la urea, NaOH y NH_4OH . También se pueden

realizar modificaciones en condiciones ácidas con el uso de ácido clorhídrico. Estas modificaciones pueden ser utilizadas directamente en la proteína final o como un pretratamiento, debido a que incrementa la solubilidad en ciertas condiciones o promueve la precipitación (Nikbakht-Nasrabadi *et al.*, 2021). El efecto que puede presentar sobre la cadena peptídica depende de las características de cada proteína (composición, carga neta, punto isoeléctrico, entre otros) y del rango de pH utilizado.

Un estudio realizado por Tan *et al.* (2021), donde la proteína de soya es modificada por pH y la aplicación de presiones hidrostáticas, reveló cómo los cambios de pH tienen un efecto sobre la estructura secundaria de la proteína. Se demostró que, conforme se acercan a un pH neutro, las estructuras α -hélice tienden a disminuir (en cada condición se presentó: pH 3 de 18.84 % a 19.02 %, pH 7 de 17.50 % a 17.64 %, pH 11 de 18.85 % a 21.20 %), las láminas β se incrementan (en pH 3 de 35.64 % a 36.65 %, pH 7 de 37.88 % a 38.99 %, pH 11 de 32.37 % a 35.57 %) y las espirales al azar disminuyen (pH 3 27.86 % a 28.18 %, pH 7 26.45 % a 27.26 %, pH 11 de 27.69 % a 28.99 %). Este cambio en la estructura secundaria es importante porque una menor cantidad de láminas β y un mayor contenido de giros α y espirales al azar hacen que la proteína sea más flexible, lo que favorece sus propiedades de superficie (formación de espumas y emulsiones) (tabla I) (Tan *et al.*, 2021).

Además, se ha demostrado que el cambio de pH durante el procesamiento de una proteína afecta sus propiedades tecnológicas. En la investigación de Li *et al.* (2020), al someter a distintos pH la proteína por un periodo de una hora y posterior neutralización, se observaron cambios en la solubilidad (en control 79.39 %, de pH 2 a 12 de 32.88 % a 89.87 %), en el tamaño de partícula (control 15.77 %, de pH 2 a 12 de 13.90 % a 19.54 %) y la hidrofobicidad de superficie (control 550 nm, de pH 2 a 12 de 300 a 2000 nm). En dicho estudio se reafirma que la menor solubilidad se presenta cuando las estructuras proteicas son más compactas y ordenadas, con cambios en el contenido de α -hélice (control 15.77 %, de pH 2 a 12 de 13.90 % a 19.54 %) y en la presencia de espirales al azar (control 40 %, de pH 2 a 12 de 39.28 % a 40.84 %). Dichos cambios afectan la disponibilidad

de los grupos sulfhidrido y de las regiones hidrofóbicas de la proteína. Este estudio evidenció que el uso del pH como tratamiento es una alternativa sencilla y accesible para modificar las propiedades tecno-funcionales. Por lo anterior, se sugiere analizar el efecto del tiempo, el tipo y la concentración de los reactivos en la conformación proteica, así como considerar investigar la optimización de los procesos para obtener la propiedad deseada y determinar cómo estos cambios se relacionan con su digestibilidad.

2.5. Otros métodos químicos de modificación

2.5.1. Tiolación

Para realizar la tiolación se emplean el anhídrido S-acetilmercaptosuccínico (S-AMSA) o el N-acetilhomocisteína (N-AHTL). Durante esta reacción se generan un grupo sulfhidrido terminal y enlaces isopeptídicos (figura 2), también puede promover la formación de complejos con otras moléculas, así como un incremento en la viscosidad del sistema en el que se utilice la proteína. Esta modificación requiere pH muy básico y largos periodos, siendo esta la principal razón por la que existen pocos estudios sobre su uso (Gaonkar y McPherson, 2016). Cabe mencionar que, al ser una de las modificaciones químicas menos empleadas, no existen suficientes estudios que sustenten su utilización, sin embargo, no se han reportado investigaciones que demuestren que los reactivos empleados o los residuos de su uso durante la modificación de proteínas representen un riesgo para la salud. Por lo tanto, existe la posibilidad de realizar futuros estudios para utilizar, optimizar y descartar este método.

2.5.2. Desamidación

En la reacción de desamidación se busca cambiar a los grupos amino de los aminoácidos polares sin carga por grupos carboxilo que incrementan la carga negativa neta de la proteína. Una de las

principales ventajas de esta modificación es que no se requieren condiciones extremas ni la adición de sustancias químicas. El método puede clasificarse según el tipo de tratamiento (ácido, alcalino y tratamiento de resina de intercambio catiónico). Se ha reportado que además de reducir el sabor amargo, esta modificación también puede disminuir la alergenicidad de algunas proteínas, por ejemplo, la de la gliadina en el gluten (Nikbakht-Nasrabadi *et al.*, 2021).

A pesar de que existen varias investigaciones centradas en su aplicación en proteínas de origen animal y otras fuentes vegetales, son nulos los trabajos enfocados en su uso para la modificación de proteínas de leguminosas. Ello demuestra la necesidad de investigación en esta área y método para validar la aplicación de dicha modificación en el mejoramiento de las propiedades tecno-funcionales de dichas proteínas.

Las futuras investigaciones pueden analizar el efecto que tiene esta y todas las modificaciones descritas en la biodisponibilidad de las proteínas, su actividad biológica, calidad nutricional y digestibilidad. La información que se genere propiciará una utilización más eficiente de las proteínas de leguminosas para la formulación de alimentos.

3. Aplicaciones en alimentos de proteínas de leguminosas modificadas

La modificación química de las proteínas afecta de manera importante a las propiedades tecno-funcionales, por lo que de la caracterización de estas depende su aplicación en alimentos. Existen diversos estudios que describen la aplicación directa en alimentos de proteínas modificadas por procesos físicos como la sonicación, tratamientos térmicos, entre otros (Hu *et al.*, 2019; Meurer *et al.*, 2020). Sin embargo, existen escasas investigaciones de proteínas modificadas químicamente que se apliquen directamente a la formulación de una matriz alimentaria.

Se ha aplicado la proteína de chícharo fosforilada para la sustitución de hasta un 20 % de la goma xantana empleada en la fabricación de una crema ligera en pastel *mousse* de mango, en donde se mostraron propiedades sensoriales semejantes al producto sin su incorporación (Liu *et al.*, 2020). Igualmente, se ha estudiado el uso de proteínas glucosiladas como emulgentes, ejemplo de ello es la investigación de aislado de proteína de cacahuate con dextrano o con maltodextrina (Lin *et al.*, 2017). También se ha sugerido el uso de la proteína de soya glucosilada como sustituto de grasa en productos lácteos de bajo contenido de lípidos (Liu *et al.*, 2021). Sin embargo, se debe considerar el realizar estudios donde se correlacione el grado de modificación, el tamaño de partícula y cambios en las propiedades sensoriales en los alimentos.

De igual manera, se ha investigado el uso de proteínas de leguminosas modificadas químicamente como material para la encapsulación de compuestos bioactivos. Por ejemplo, la proteína de garbanzo sometida a acilación y cationización fue empleada para encapsular ácido ascórbico y α -tocoferol. Así como la mezcla de proteína de soya con proteína de garbanzo glucosilada para la encapsulación de aceite de maíz (Sharif *et al.*, 2018). Asimismo, se ha estudiado la modificación por pH de la proteína de soya y su efecto en el (-)-epigallocatequina-3-galato (EGCG, el principal componente bioactivo del té verde); demostrando que al interactuar con la proteína de soya modificada se mejoró su biodisponibilidad *in-vitro* (26 % de EGCG solo, 27 % con el aislado de proteína, 32 % con el aislado tratado con cambio de pH 2 y 37 % con el aislado tratado con cambio de pH 12) (Yan *et al.*, 2021).

Las posibilidades del uso de las proteínas modificadas de leguminosas son diversas, demostrando una buena área de oportunidad para realizar estudios. En futuras investigaciones deben considerarse las características deseadas por los consumidores, la sustitución parcial o total de proteínas de origen animal u otro componente por proteínas modificadas. Esto puede represen-

tar una disminución en la cantidad de ingredientes utilizados o el mejoramiento de las características del alimento.

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Las proteínas de leguminosas modificadas son una alternativa interesante para la formulación de alimentos al promover sus propiedades tecno-funcionales. El grado de modificación dependerá de distintos factores como los tiempos de reacción, pH, temperatura, concentración de sustrato o los reactivos empleados, así como la especie vegetal. Al modificar estos parámetros se generan cambios estructurales de las fracciones de proteínas en leguminosas (legúmina y vicilina); en estas modificaciones generalmente se emplean reactivos seguros. Sin embargo, aún falta realizar estudios sobre modificaciones como la tiolación y la desamidación en torno a su inocuidad y su aplicación en proteínas de leguminosas para la formulación de alimentos.

En general, para todos los métodos de modificación química, son necesarias futuras investigaciones centradas en su aplicación directa en productos alimenticios y que describan su efecto en la digestibilidad, junto con la correlación de propiedades sensoriales y la configuración estructural de las proteínas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) –hoy Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)– por la beca de doctorado de Lizbeth Rosas Ordoñez.

REFERENCIAS

- Akharume, F. U., Aluko, R. E. y Adedeji, A. A. (2021). Modification of plant proteins for improved functionality: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(1), 198-224. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12688>
- Aluko, R. E., Girgih, A. T., He, R., Malomo, S., Li, H., Offengenden, M. y Wu, J. (2015). Structural and functional characterization of yellow field pea seed (*Pisum sativum* L.) protein-derived antihypertensive peptides. *Food Research International*, 77, 10-16. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.03.029>
- Aryee, A. N. A., Agyei, D. y Udenigwe, C. C. (2018). Impact of processing on the chemistry and functionality of food proteins. En *Proteins in Food Processing*, segunda edición (pp. 27-45). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100722-8.00003-6>
- Barać, M. B., Pešić, M. B., Stanojević, S. P., Kostić, A. Z. y Čabriló, S. B. (2015). Techno-functional properties of pea (*Pisum sativum*) protein isolates-a review. *Acta Periodica Technologica*, 46, 1-18. <https://doi.org/10.2298/APT1546001B>
- Basak, S. y Singhal, R. S. (2022). Succinylation of food proteins, a concise review. *LWT*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112866>
- Carbonaro, M., Maselli, P. y Nucara, A. (2015). Structural aspects of legume proteins and nutraceutical properties. *Food Research International*, 76(P1), 19-30. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.11.007>
- Charoensuk, D., Brannan, R. G., Chanasattru, W. y Chaiyasit, W. (2018). Physicochemical and emulsifying properties of mung bean protein isolate as influenced by succinylation. *International Journal of Food Properties*, 21(1), 1633-1645. <https://doi.org/10.1080/10942912.2018.1502200>
- Cui, L., Bandillo, N., Wang, Y., Ohm, J. B., Chen, B. y Rao, J. (2020). Functionality and structure of yellow pea protein isolate as affected by cultivars and extraction pH. *Food Hydrocolloids*, 108(December 2019), 106008. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106008>
- Day, L. (2013). Proteins from land plants e Potential resources for human nutrition and food security. *Trends in Food Science & Technology*, 32(1), 25-42. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.05.005>
- De Angelis, A., Gasco, L., Parisi, G. y Danieli, P. P. (2021). A Multipurpose Leguminous Plant for the Mediterranean Countries: *Leucaena leucocephala* as an Alternative Protein Source: A Review. *Animals*, 11(8), 2230.
- Didinger, C. y Thompson, H. J. (2021). Defining nutritional and functional niches of legumes: A call for clarity to distinguish a future role for pulses in the dietary guidelines for americans. *Nutrients*, 13(4), 1100. <https://doi.org/10.3390/nu13041100>
- El-Adawy, T. A. (2000). Functional properties and nutritional quality of acetylated and succinylated mung bean protein isolate. *Food Chemistry*, 70(1), 83-91. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(00\)00079-0](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(00)00079-0)
- Fu, G. M., Xu, Z. W., Luo, C., Xu, L. Y., Chen, Y. R., Guo, S. L., Wu, X. D., Wan, Y. (2021). Modification of soy protein isolate by Maillard reaction and its application in microencapsulation of *Limosilactobacillus reuteri*. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 132(4), 343-350. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2021.06.007>
- Gaonkar, A. G. y McPherson, A. (2016). *Thiolation en Ingredient interactions: effects on food quality*. CRC Press. pp. 319-321.
- Ghribi, M. A., Gafsi, M. I., Blecker, C., Danthine, S., Attia, H. y Besbes, S. (2015). Effect of drying methods on physico-chemical and functional properties of chickpea protein concentrates. *Journal of Food Engineering*, 165, 179-188. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.06.021>
- Hadidi, M., Jafarzadeh, S. y Ibarz, A. (2021). Modified mung bean protein: Optimization of microwave-assisted phosphorylation and its functional and structural characterizations. *LWT*, 151. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112119>
- Hu, Z., Qiu, L., Sun, Y., Xiong, H. y Ogra, Y. (2019). Improvement of the solubility and emulsifying properties of rice bran protein by phosphorylation with sodium trimetaphosphate. *Food Hydrocolloids*, 96, 288-299. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.05.037>
- Jarpa-Parra, M., Bamdad, F., Wang, Y., Tian, Z., Temelli, F., Han, J. y Chen, L. (2014). Optimization of lentil protein extraction and the influence of process pH on protein structure and functionality. *LWT - Food Science and Technology*, 57(2), 461-469. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.02.035>
- Kinsella, J. E. (1976). Functional properties of proteins in foods: A survey. *CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 7(3), 219-280. <https://doi.org/10.1080/10408397609527208>
- Klost, M. y Drusch, S. (2019). Functionalisation of pea protein by tryptic hydrolysis, characterisation of interfacial and functional properties. *Food Hydrocolloids*, 86, 134-140. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.03.013>
- Krause, J. P., Krägel, J. y Schwenke, K. D. (1997). Properties of interfacial films formed by succinylated legumin from faba beans (*Vicia faba* L.). *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 8(6), 279-286.
- Lafarga, T., Villaró, S., Bobo, G. y Aguiló-Aguayo, I. (2019). Optimisation of the pH and boiling conditions needed to obtain improved foaming and emulsifying properties of chickpea *aquafaba* using a response surface methodology. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 18, 100177. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2019.100177>

- Lagarda-Díaz, I., Guzmán-Partida, A. M. y Vázquez-Moreno, L. (2017). Legume lectins: Proteins with diverse applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(6), 1242. <https://doi.org/10.3390/ijms18061242>
- Lin, D., Lu, W., Kelly, A. L., Zhang, L., Zheng, B. y Miao, S. (2017). Interactions of vegetable proteins with other polymers: Structure-function relationships and applications in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 68, 130-144.
- Li, J., Wu, M., Wang, Y., Li, K., Du, J. y Bai, Y. (2020). Effect of pH-shifting treatment on structural and heat induced gel properties of peanut protein isolate. *Food Chemistry*, 325, 126921.
- Li, R., Cui, Q., Wang, G., Liu, J., Chen, S., Wang, X., Wang, X. y Jiang, L. (2019). Relationship between surface functional properties and flexibility of soy protein isolate- glucose conjugates. *Food Hydrocolloids*, 95, 349-357. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.04.030>
- Liu, J., Wan, Y., Ren, L., Li, M., Lv, Y., Guo, S. y Waqar, K. (2021). Physical-chemical properties and *in vitro* digestibility of phosphorylated and glycosylated soy protein isolate. *LWT*, 152, 112380. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112380>
- Liu, Y., Wang, D., Wang, J., Yang, Y., Zhang, L., Li, J. y Wang, S. (2020). Functional properties and structural characteristics of phosphorylated pea protein isolate. *International Journal of Food Science and Technology*, 55(5), 2002-2010. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14391>
- Meurer, M. C., De Souza, D. y Ferreira Marczak, L. D. (2020). Effects of ultrasound on technological properties of chickpea cooking water (*aquafaba*). *Journal of Food Engineering*, 265, 109688. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109688>
- Nikbakht-Nasrabadi, M., Sedaghat-Doost, A. y Mezzenga, R. (2021). Modification approaches of plant-based proteins to improve their techno-functionality and use in food products. *Food Hydrocolloids*, 118, 106789. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106789>
- Olmedilla-Alonso, B., Farré-Rovir, R., Asensio-Vegas, C. y Martín-Pedrosa, M. (2010). Papel de las leguminosas en la alimentación actual. *Actividad Dietética*, 14(2), 72-76.
- Pastor-Cavada, E., Juan, R., Pastor, J. E., Alaiz, M. y Vioque, J. (2010). Protein isolates from two Mediterranean legumes: *Lathyrus clymenum* and *Lathyrus annuus*. Chemical composition, functional properties and protein characterisation. *Food Chemistry*, 122(3), 533-538. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.03.002>
- Pauli, G. (2011). Allergènes végétaux alimentaires identifiés (en dehors de l'arachide). *Revue Française d'Allergologie*, 51(1), 56-62. <https://doi.org/10.1016/j.reval.2010.06.009>
- Pedrosa, C., Trisciuzzi, C. y Ferreira, S. T. (1997). Effects of glycosylation on functional properties of vicilin, the 7S storage globulin from pea (*Pisum sativum*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45(6), 2025-2030. <https://doi.org/10.1021/jf960815k>
- Rodríguez-Canto, W., Chel-Guerrero, L., Fernández, V. V. A. y Aguilar-Vega, M. (2019). *Delonix regia* galactomannan hydrolysates: Rheological behavior and physicochemical characterization. *Carbohydrate Polymers*, 206, 573-582. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.028>
- Sharif, H. R., Williams, P. A., Sharif, M. K., Abbas, S., Majeed, H., Masamba, K. G., ... y Zhong, F. (2018). Current progress in the utilization of native and modified legume proteins as emulsifiers and encapsulants, a review. *Food Hydrocolloids*, 76, 2-16.
- Schwenke, K. D. (2001). Reflections about the functional potential of legume proteins: A review. *Nahrung-Food*, 45(6), 377-381. [https://doi.org/10.1002/1521-3803\(20011001\)45:6<377::AID-FOOD377>3.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/1521-3803(20011001)45:6<377::AID-FOOD377>3.0.CO;2-G)
- Schwenke, K. D., Knopfe, C., Mikheeva, L. M. y Grinberg, V. Y. (1998). *Structural Changes of Legumin from Faba Beans (Vicia faba L.) by Succinylation*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(6), 2080-2086. <https://doi.org/10.1021/jf970984k>
- Shah, N. N., K.V., U. y Singhal, R. S. (2019). Hydrophobically modified pea proteins: Synthesis, characterization and evaluation as emulsifiers in eggless cake. *Journal of Food Engineering*, 255, 15-23. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.03.005>
- Stone, A. K., Nosworthy, M. G., Chiremba, C., House, J. D. y Nickerson, M. T. (2019). A comparative study of the functionality and protein quality of a variety of legume and cereal flours. *Cereal Chemistry*, 96(6), 1159-1169. <https://doi.org/10.1002/cche.10226>
- Tan, M., Xu, J., Gao, H., Yu, Z., Liang, J., Mu, D., ... Zheng, Z. (2021). Effects of combined high hydrostatic pressure and pH-shifting pretreatment on the structure and emulsifying properties of soy protein isolates. *Journal of Food Engineering*, 306, 110622. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110622>
- Yan, S., Xu, J., Zhang, X., Xie, F., Zhang, S., Jiang, L., ... y Li, Y. (2021). Effect of pH-shifting treatment on the structural and functional properties of soybean protein isolate and its interactions with (-)-epigallocatechin-3-gallate. *Process Biochemistry*, 101, 190-198.
- Zhang, Q., Li, L., Lan, Q., Li, M., Wu, D., Chen, H., Liu, Y., Lin, D., Qin, W., Zhang, Z., Liu, J. y Yang, W. (2019). Protein glycosylation: a promising way to modify the functional properties and extend the application in food system. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(15), 2506-2533.



El uso de filtros en el procesamiento de bebidas:

actualidad y nuevos retos

R. Hernández-López* y N. Ramírez-Corona

*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos
Correos electrónicos: rosa.hernandezlz@udlap.mx • nelly.ramirez@udlap.mx

RESUMEN

Las membranas y los filtros son ampliamente utilizados en el procesamiento de los alimentos líquidos. En el presente artículo, se revisarán los principales tipos de filtración: microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa, así como los materiales utilizados para este fin. Dichos materiales pueden ser muy variados, dependiendo del tipo de separación que se busque, la presión de operación, el flujo a procesar, entre otros factores. Durante los últimos años se han perfeccionado procesos como la purificación de agua para consumo humano, la clarificación o la concentración de las bebidas, principalmente para jugos, y la recuperación de componentes bioactivos; en este trabajo se describirán estudios al respecto. Actualmente se siguen realizando investigaciones que permitan ampliar las aplicaciones de los procesos de filtración, buscando resolver las necesidades actuales o nuevos retos. Algunas de estas aplicaciones son la utilización de membranas para realizar análisis de microplásticos, u otros contaminantes presentes en las bebidas embotelladas, concentrar compuestos de interés en las bebidas para mejorar su aroma o sabor, su implementación para la esterilización en frío o el uso de filtros funcionalizados.

Palabras clave: membranas, filtración, filtros funcionalizados.

ABSTRACT

Membranes are widely used in the filtration of liquid foods. This article will review the main types of filtrations: microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration, and reverse osmosis, as well as the different materials packed in filters and membranes. Those materials can be very varied, depending on the type of separation, operating pressure, flow rate, among other factors. In recent years, processes such as purification of water for human consumption, clarification or concentration of beverages, mainly for juices, and recovery of bioactive components, have been enhanced. This review discusses the literature reported in this regard. Research is currently being carried out for applications or procedures that meet current needs or new challenges. Some of these applications are the use of membranes to analyze microplastics or other contaminants present in bottled beverages, concentrate compounds of interest in beverages to improve their aroma or flavor, their implementation for cold sterilization, or the use of functionalized filters.

Keywords: membranes, filtration, functionalized filters.

INTRODUCCIÓN

La industria de los alimentos se enfrenta día con día a nuevos retos y oportunidades de desarrollo, siempre cuidando la calidad y seguridad de los alimentos. Cada una de las bebidas desarrolladas a lo largo de los años ha exigido el uso de tecnologías adaptadas al producto en cuestión, con la finalidad de garantizar sus características físicas, químicas y sensoriales. Por ejemplo, para la clarificación en vinos y jugos se han desarrollado filtros o membranas con características específicas, elaboradas con diferentes materiales y manipuladas en determinadas condiciones de operación, con la finalidad de separar impurezas como semillas, microorganismos, levadura, restos de tierra, sedimento o pulpa, del jugo o vino, para posteriormente pasar a la etapa de pasteurización y así garantizar la vida útil de producto (Mierczynska-Vasilev y Smith, 2015).

En el presente artículo de revisión, se discutirán las principales aplicaciones de filtros y membranas utilizadas en el tratamiento de alimentos líquidos o bebidas durante diferentes etapas de procesamiento. Estas aplicaciones incluyen la clarificación de jugos (Bhattacharjee *et al.*, 2017; Charcosset, 2021; McCabe *et al.*, 1991), extracción de compuestos de interés en jugo (Rastogi, 2018), té o café (Chemat *et al.*, 2017; Kumar *et al.*, 2020; Medeiros *et al.*, 2006), concentración de jugos (Arend *et al.*, 2019; Dincer *et al.*, 2016; Gurak *et al.*, 2010; Van Der Sluis *et al.*, 2005), obtención de agua purificada o ultrapura (Bortolassi *et al.*, 2017), recuperación de componentes bioactivos presentes en jugos (Kumar *et al.*, 2020; Macpherson *et al.*, 1977; Waley *et al.*, 2020), recuperación de enzimas (Barbosa-Ríos *et al.*, 2018; Kumar *et al.*, 2020; Ye y Berson, 2014), entre otros.

En la actualidad, se continúa con el desarrollo e investigación de los filtros para la industria alimentaria, particularmente en el desarrollo de nuevos materiales o la modificación de sus propiedades a través de la funcionalización. Los materiales funcionalizados —a los que se les agrega un grupo funcional distinto, que otorga propiedades físicas y químicas diferentes a las que tendría el material en su forma original— han sido utilizados para resolver problemas de bioquímica, contaminación ambiental y empaques de alimentos (Choi *et al.*, 2021; Cuthbert *et al.*, 2021; Källrot *et al.*, 2006; Khalloufi *et al.*, 2010; Peña-Gómez *et al.*, 2018).

Si bien las principales aplicaciones de este tipo de materiales en la industria alimentaria han sido para desarrollar empaques inteligentes, con función antimicrobiana y comestibles, entre otros, en años recientes se han desarrollado nuevos materiales funcionalizados para mejorar el desempeño de los filtros durante el tratamiento a las bebidas. En este artículo se tratarán también las nuevas aplicaciones de los filtros y membranas reportadas por diferentes grupos de investigadores. Algunos ejemplos de estas nuevas aplicaciones incluyen el uso de filtros para realizar análisis de microplásticos presentes en bebidas embotelladas en contenedores de plástico, o las membranas utilizadas para la esterilización en frío de bebidas, así como el desarrollo de filtros con actividad antimicrobiana, al funcionalizar los materiales que componen al filtro con aceites esenciales (Barboza *et al.*, 2018; Laorko *et al.*, 2015; Pal *et al.*, 2018).

La pandemia del SARS-CoV-2 puso de manifiesto las debilidades de materiales de filtrado que no han presentado innovaciones en las últimas décadas (Cuthbert *et al.*, 2021), refiriéndose a las telas de las mascarillas desechables y del equipo de protección personal. La situación anterior se puede extrapolar a la industria

de alimentos, donde sí se han desarrollado nuevos materiales, pero aún se puede explorar el uso de la filtración con otras aplicaciones y tecnologías.

La revisión presentada en este artículo tiene por objetivo describir los tipos de filtros y membranas que se han utilizado en la industria de bebidas para los procesos de clarificación de jugos y vinos, purificación de agua y concentración de jugo; las nuevas aplicaciones que se basan en estos procesos; la evolución de los materiales de filtrado de la industria alimentaria, así como los avances más recientes y retos que enfrentan estas tecnologías.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. Filtros y membranas utilizados en los procesos de filtración

La filtración implica un importante proceso no térmico utilizado en la industria alimentaria para la clarificación, concentración y estabilización microbiana de bebidas (Gialleli *et al.*, 2016). La filtración con membranas basadas en materiales como polisulfonas, polipropileno, poliamida, nailon o acetato de celulosa se utiliza en la industria alimentaria para la eliminación total o parcial de microorganismos presentes en cerveza, vino y jugos, pero el ensuciamiento de la membrana y los métodos de limpieza son factores críticos para la aplicación extensiva de esta tecnología (Gialleli *et al.*, 2016).

Las membranas cerámicas de minerales naturales (zeolita, apatita, arcillas, caolina, dolomita, etc.) se utilizan para la clarificación de bebidas con bajo costo (Rascon-Escajeda *et al.*, 2018). La filtración de lecho a base de arena o tierra de diatomeas se

utiliza para la eliminación de materia orgánica y microorganismos del agua y alimentos líquidos, pero estos no cumplen con la eficiencia necesaria para eliminar patógenos y presentan problemas de regeneración/eliminación (Arthanareeswaran *et al.*, 2008; Devi *et al.*, 2008).

En la figura 1 se muestran los tipos de filtrado de acuerdo con la dirección del fluido. En la filtración de flujo normal o sin salida, el fluido se conduce directamente hacia la membrana bajo una presión aplicada. Las partículas que son demasiado grandes para pasar a través de los poros de la membrana se acumulan en su superficie o en la profundidad del medio de filtración, mientras que las moléculas más pequeñas pasan al lado de aguas abajo. En la filtración de flujo cruzado o tangencial, el fluido se bombea tangencialmente a lo largo de la superficie de la membrana. La diferencia de presión obliga a una parte del fluido a pasar a través de la membrana (aguas abajo), mientras que el resto sigue circulando en el sentido del flujo. Las partículas y macromoléculas que son demasiado grandes para pasar a través de los poros de la membrana se retienen en la parte de arriba. En este caso los componentes retenidos no se acumulan en la superficie de la membrana, sino que son arrastrados por el flujo tangencial (Echavarría *et al.*, 2011).

La filtración se puede clasificar generalmente según el tamaño de los poros de la membrana o del material. Las técnicas de filtración utilizadas para eliminar materia orgánica, microorganismos, así como otros contaminantes del agua y los alimentos líquidos, son microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (RO). La tabla I muestra esta clasificación del proceso con las principales características para cada técnica.

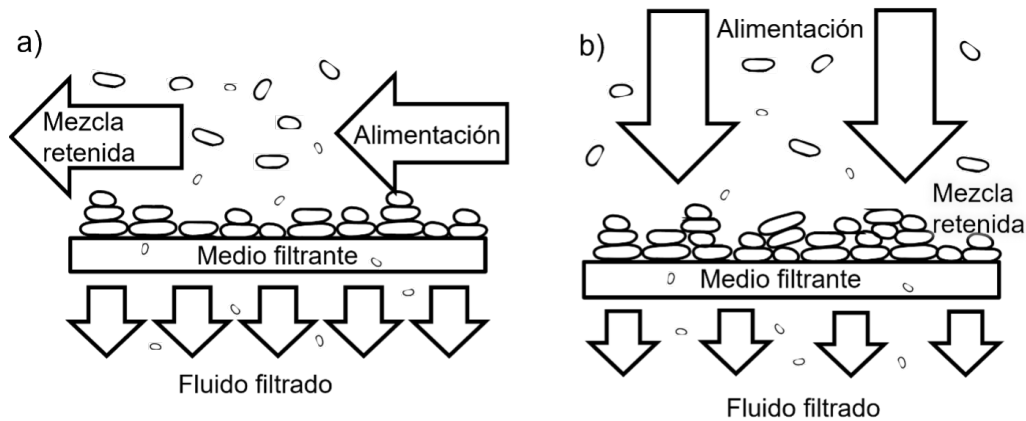


Figura 1.

Tipos de filtrado de acuerdo con la dirección del fluido: a) filtración sin salida, b) filtración de flujo cruzado. Adaptada de Zhaochu Yang *et al.*, 2009.

Tabla 1. Tipo de membrana para filtración

	MF	UF	NF	RO
Tamaño de poro, μm	0.1 - 10	0.001 - 0.1	0.0001 - 0.001	<0.0001
Componentes a retener	Partículas, arcilla, bacterias	Compuestos orgánicos, macromoléculas, proteínas, polisacáridos, coloides	HMWC, mono- di- y oligosacáridos, iones negativos polivalentes, oligosacáridos	HMWC, LMWC, cloruro de sodio, glucosa, aminoácidos, proteínas

MF - Microfiltración, UF - Ultrafiltración, NF - Nanofiltración, RO - Ósmosis inversa, HMWC - Componentes de alto peso molecular, LMWC - Componentes de bajo peso molecular.

1.1. Microfiltración

La microfiltración y la ultrafiltración implican la separación de macromoléculas en las que principalmente tiene lugar un proceso de tamizado como mecanismo de transporte. En la industria alimentaria, el objetivo principal de MF es clarificar bebidas mediante la eliminación de sólidos en suspensión, grasas y proteínas de alto peso molecular (Vu *et al.*, 2016).

Sin embargo, en los procesos de MF se pueden llegar a retener compuestos bioactivos, como polifenoles, azúcares, vitaminas y proteínas responsables de las propiedades organolépticas de las bebidas (Rascon-Escajeda *et al.*, 2018). Otro inconveniente de

estas técnicas es el ensuciamiento de la membrana o filtro, pues afecta negativamente el rendimiento, la capacidad de filtración y la vida útil (Vu *et al.*, 2016). La MF se enfoca principalmente en la eliminación de grandes sólidos en suspensión, como la suspensión biótica (cosecha de células, suspensión de levadura, suspensiones de microalgas), suspensión mineral, deshidratación de lodos y suspensión modelo (Ming *et al.*, 2021).

1.2. Ultrafiltración

La capacidad de la UF para retener proteínas se ha utilizado en la industria láctea para recuperar nutrientes y producir queso

mejorado (Ding *et al.*, 2016); extraer y concentrar proteínas bioactivas, como la caseína y las proteínas del suero de leche (Crowley *et al.*, 2014), así como para desarrollar nuevas formulaciones de leche infantil con mayor estabilidad térmica de las proteínas (Crowley *et al.*, 2015).

Según el tipo de fluido a procesar, la microfiltración y la ultrafiltración se aplican ampliamente para separar partículas finas de líquidos, mientras que la nanofiltración y la ósmosis inversa se han utilizado comúnmente para eliminar los componentes disueltos (Bhattacharjee *et al.*, 2017; Rascon-Escajeda *et al.*, 2018).

MF y UF utilizan principalmente polímeros como polisulfona (PSF), polietersulfona (PES), poliacrilonitrilo (PAN), polipropileno (PP), politetrafluoroetileno (PTFE) y fluoruro de polivinilideno (PVDF) como materiales de membrana. Estos materiales exhiben una excelente permeabilidad, selectividad y estabilidad (química, mecánica y térmica) en aplicaciones de tratamiento de agua. Las membranas de PSF y PES parecen estar entre los materiales más comunes para las membranas de UF. Sin embargo, existe la necesidad de optimizar y mejorar el rendimiento de separación de estas membranas poliméricas, así como mejorar algunas otras propiedades físicas como la estabilidad, el perfil de hidrofilia y la resistencia al ensuciamiento (Castro-Muñoz, 2020).

1.3. Nanofiltración

La nanofiltración se utiliza para la separación, concentración y purificación de moléculas biofuncionales (Nath *et al.*, 2018), desalcoholización de cerveza y vino (Mangindaan *et al.*, 2018) y se ha aplicado ampliamente para la concentración y separación de la carga de proteína de suero (Kotsanopoulos y Arvanityannis, 2015).

Los filtros de celulosa de profundidad son materiales porosos capaces de eliminar contaminantes y retener moléculas no solo en la superficie sino también dentro del medio. En la industria alimentaria, la nanocelulosa se ha explorado ampliamente como un polímero alternativo en membranas y filtros, especialmente en la clarificación de bebidas, debido a sus propiedades únicas, como el alta área de superficie, alta resistencia, humectabilidad, facilidad de funcionalización química y bajo impacto ambiental (Onur *et al.*, 2018). La NC también tiene una alta relación área-volumen, lo que aumenta la capacidad de absorción del material (Salas *et al.*, 2014).

1.4. Ósmosis inversa

En la ósmosis inversa se debe aplicar una presión hidráulica mayor que la presión osmótica para que el agua pase de una concentración alta de soluto a una baja concentración de soluto (Rastogi, 2018). La ósmosis inversa se utiliza para concentrar, purificar y recuperar componentes valiosos (Bhattacharjee *et al.*, 2017). El proceso de ósmosis inversa se ha empleado especialmente para clarificar y preconcentrar zumos de frutas (Rastogi, 2018). Matta *et al.* (2004) realizaron microfiltración y ósmosis inversa para clarificación y preconcentración de jugo de acerola; la ósmosis inversa realizada a una presión transmembrana de 6 MPa permitió concentrar jugo clarificado de 7° Brix a 29.2° Brix. El jugo concentrado mejoró su contenido de vitamina C en 4.2 veces alcanzando 5229 mg/100 g.

De acuerdo con Jain y De (2019), entre los materiales utilizados para la preparación de membranas de ósmosis inversa se encuentran el acetato de celulosa (CA), triacetato de celulosa (CTA), poliamida (PA), polietersulfona (PES) y polibencimidazol (PBI). Estos materiales presentan alta retención de compuestos orgánicos de bajo peso molecular, estabilidad física y química, lo que resulta en ahorros económicos y de tiempo en el proceso de concentración de jugos comparado con procesos térmicos.

1.5. Bebidas alcohólicas y bebidas no alcohólicas

En el nivel más básico, una bebida es un tipo de alimento líquido que se consume para satisfacer nuestros antojos, y que proporciona nutrición, energía e hidratación. No solo ayuda a mantenernos frescos, sino que también suministra complementos alimenticios. Su calidad varía dependiendo del tipo de bebida, cada una con características que la catalogan como calmantes de la sed, bebida social, con valor nutritivo y con propiedades medicinales. Las bebidas se dividen de manera general en dos categorías: alcohólicas y no alcohólicas (Charcosset, 2021).

Las bebidas alcohólicas son intoxicantes ya que contienen etanol, comúnmente conocido como alcohol. De acuerdo con el estándar indio, las bebidas que contienen entre 0.5 % y 42.8 % (v/v) de alcohol se clasifican como alcohólicas. En la norma internacional, las bebidas alcohólicas pueden contener entre 0.5 % y 55 % (v/v) de alcohol. Las bebidas alcohólicas se producen mediante la fermentación controlada de granos, frutas y caña de azúcar como materia prima, tratándolas con levadura

(Redan, 2020). La fermentación consiste en una serie de reacciones metabólicas, donde la levadura disocia las moléculas de glucosa a diferentes temperaturas, produciendo alcohol etílico, gas dióxido de carbono y energía (Buglass, 2010; Panda *et al.*, 2014).

Las bebidas no alcohólicas se refieren a bebidas no embriagantes o gaseosas dulces sin alcohol. En otras palabras, no se fermentan ni se destilan. El jugo de frutas es la bebida más importante de esta categoría. Existe una gran variedad de bebidas disponibles en el mercado que tienen pulpa de fruta como material base. Algunas se consumen en forma pura, mientras que otras se ingieren en forma diluida agregando agua o jarabe de azúcar. Por lo tanto, las bebidas de frutas se pueden clasificar en: (1) aquellas que deben consumirse instantáneamente después de abrirlas y (2) aquellas que pueden almacenarse durante algún tiempo después de abrirlas (Castro-Enríquez *et al.*, 2020). El jugo que se consume inmediatamente no necesita conservador. Para el jugo almacenado, se debe agregar una cierta cantidad de aditivo permitido para lograr una vida útil prolongada. En general, las bebidas de frutas se pueden diferenciar como jugo (jugo puro de fruta), néctar (contiene un 30 % de pulpa de fruta y se consume inmediatamente después de abrir), calabazas (contiene al menos un 25 % de pulpa y jarabe de azúcar y se consume diluido con agua), cordiales (calabazas con textura clara) y jarabes (con alto contenido de azúcar y jugo claro concentrado) (Barrows y Robinson, 2018; Bhat *et al.*, 2017).

2. Aplicación de filtros para bebidas

El medio filtrante es el elemento fundamental para la práctica de la filtración; entre los principales criterios de selección del material de medio filtrante se pueden destacar la compatibilidad,

resistencia química con la mezcla, permeabilidad al fluido, resistencia a las presiones de filtración, capacidad en la retención de sólidos, adaptación al equipo de filtración, equipo de mantenimiento y relación vida útil-coste (Rascon-Escajeda *et al.*, 2018); a continuación, se describen algunos de los procesos donde se aplican membranas para el tratamiento de bebidas.

2.1. Agua ultrapura, ablandamiento del agua

En el presente siglo, uno de los problemas más serios y desafiantes para el mundo es proporcionar agua pura y limpia a la población en constante aumento. Entre las diversas tecnologías de tratamiento de aguas, la de membrana domina principalmente por dos razones, la rentabilidad y la mayor eficiencia. Además, entre las diversas membranas, las poliméricas presentan ventajas económicas y prácticas en el tratamiento de aguas residuales provenientes de diferentes industrias y mercados. Las membranas poliméricas se aplican ampliamente para el ablandamiento del agua, la desalinización, el ablandamiento de aguas residuales municipales, la purificación de aguas residuales industriales y la producción de agua ultrapura (Papafotopoulou-Patrinou *et al.*, 2016). Las membranas poliméricas pueden proporcionar nuevas perspectivas en la mejora de algunas membranas novedosas e inteligentes para la remediación de varios cuerpos de agua contaminados (Khan y Shah, 2021).

Los avances recientes en la tecnología de membranas han permitido la recuperación de aguas residuales municipales para la producción de agua potable, es decir, la reutilización de agua potable (Tang *et al.*, 2018). Por lo general, las plantas de tratamiento de reutilización para uso potable utilizan membranas poliméricas para microfiltración o ultrafiltración junto con ósmosis inversa y,

en algunos casos, nanofiltración (Deluhery y Rajagopalan, 2008). Las propiedades de la membrana, incluido el tamaño de los poros, la humectabilidad, la carga superficial, la aspereza, la resistencia térmica, la estabilidad química, la permeabilidad, el grosor y la resistencia mecánica varían entre las membranas y las aplicaciones (Warsinger *et al.*, 2018). Guo *et al.* (2010) describen el funcionamiento de pruebas de integridad de las membranas, basadas en presión, porosimetría líquida, recuento de partículas, monitoreo de partículas y monitoreo de turbidez.

Como se mencionó anteriormente, se puede utilizar la tecnología de filtrado y membranas para el ablandamiento de agua. Si bien el agua dura generalmente no se considera un peligro para la salud, es perjudicial para la infraestructura del agua y las centrales eléctricas. Existe un interés creciente en los procesos de tratamiento de agua libres de químicos, por lo tanto, otras tecnologías de tratamiento como la nanofiltración se han explorado activamente como un proceso alternativo para el ablandamiento del agua (Labban *et al.*, 2018).

De acuerdo con Wang y Lin (2019), la desionización capacitiva (CDI) es una tecnología emergente capaz de eliminar selectivamente los iones del agua; la eliminación selectiva de cationes divalentes (es decir, dureza) sobre cationes monovalentes se puede lograr simplemente utilizando membrana de desionización capacitiva (MCDI) equipado con membranas de intercambio iónico (IEM); los autores evalúan el impacto de la densidad de corriente, el tiempo de retención hidráulica y la composición de la alimentación sobre la selectividad de los cationes.

El tratamiento de aguas residuales de la industria de conservas de pescado es un reto por el alto contenido de sal que persiste después de los tratamientos convencionales. Cristóvão *et al.*

(2015) desarrollaron una secuencia de tratamiento del agua de desecho que consiste en sedimentación, coagulación-floculación química, degradación biológica aeróbica (proceso de lodos activados), seguido de una etapa de pulido por ósmosis inversa (RO) y desinfección ultravioleta (UV). Esta es la membrana de ósmosis inversa con poro de 5 μm , y con una película de reforzamiento de fibra de vidrio de la marca Aqua Química.

2.2. Clarificación de vinos

En el proceso de producción de vinos, la filtración se utiliza para disminuir la turbidez y mejorar la estabilización microbiológica (El Rayess y Mietton-Peuchot, 2016; Urkiaga *et al.*, 2002). La turbidez se debe a la presencia de macromoléculas y partículas en suspensión. Esta se puede medir con un turbidímetro y se expresa en unidades de turbidez nefelométrica (NTU). Las técnicas tradicionales de filtración incluyen la filtración sobre láminas y tierra de diatomeas. La implementación de MF es una alternativa para aumentar la clarificación y la estabilidad del vino (Mierczynska-Vasilev y Smith, 2015). Su uso está cada vez más extendido en la industria vitivinícola, debido a que permite eliminar el uso de la tierra de diatomeas y, consecuentemente, las restricciones ambientales y sanitarias asociadas, además de hacer posible la combinación de clarificación, estabilización y filtración estéril en una sola operación (El Rayess y Mietton-Peuchot, 2016).

La naturaleza de la membrana utilizada tiene una gran influencia en el ensuciamiento durante la MF del vino, ya que las interacciones de los componentes del vino con la superficie de la membrana juegan un papel importante en este proceso. Por ejemplo, Ulbricht *et al.* (2009) evaluaron la clarificación por MF de un vino blanco y mostraron que las membranas de polipropi-

leno producen flujos significativamente más altos que las membranas de polietersulfona, ambas con el mismo tamaño de poro (0.2 μm). Además, se sugirió que los agregados de polifenoles y polisacáridos presentes en el vino tinto tenían una fuerte contribución al ensuciamiento por adsorción y que la interacción entre los polifenoles y la superficie de la membrana era el fenómeno principal (Conidi *et al.*, 2020).

El estudio realizado por Rosária *et al.* (2022) evalúa el impacto que tiene el tipo de filtración durante la clarificación de vino tinto, comparando dos procesos de filtración sobre el nivel de turbidez, composición fenólica, características cromáticas y perfil sensorial del vino tinto. Los procesos evaluados son la microfiltración de flujo cruzado y la filtración de placas de membrana. Los resultados indicaron que cada proceso de filtración produce una reducción sustancial de los valores de turbidez y, por tanto, un aumento de la clarificación del vino; con ambas técnicas de filtración se redujo el contenido fenólico de los vinos tintos estudiados. Sin embargo, no se encontró una tendencia clara de diferenciación entre los vinos en función del tipo de filtración, concluyendo

que el impacto de las dos técnicas de filtración que se estudiaron es muy dependiente de la composición inicial del vino.

2.3. Concentración y purificación de jugos

Los procesos de filtración con membrana son eficientes en comparación con los evaporadores de efecto múltiple porque aumentan la concentración de soluto del producto, mediante la eliminación del agua sin cambio de fase (Zi Yang *et al.*, 2019). La filtración con membrana elimina el equipo de transferencia de calor que consume mucha energía, así como sus problemas asociados. Estos procesos implican una temperatura de procesamiento más baja (normalmente temperatura ambiente), lo cual minimiza la degradación térmica de los productos. Estos procesos relativamente suaves funcionan con flujo laminar y minimizan los cambios en las características del líquido, como el pH o la fuerza iónica (Cheryan, 1986). Otros ejemplos de clarificación y concentración en jugos se observan en la tabla II, la cual describe algunos de los resultados más relevantes según el tipo de jugo a filtrar y el tamaño de poro.

Tabla II. Jugos de fruta filtrados con membranas en diferentes procesos

Bebida	Proceso utilizado	Resultados	Referencia
Jugo de fresa	MF + NF	MF con filtro de poliamida. NF con filtro de PVDF. Incremento en la concentración de compuestos fenólicos totales y de antocianinas en 1.3 y 1.5 veces, se incrementó al doble el contenido de TAA.	Arend <i>et al.</i> , 2017
Jugo de maracuyá	MF	Se comparó una membrana tubular de cerámica y una de fibra hueca de poliimida a diferentes presiones y velocidades de centrifugación. Los mejores resultados de las pruebas sensoriales se obtienen con la membrana tubular de cerámica.	De Oliveira <i>et al.</i> , 2012
Jugo de uva	RO	El jugo de uva se concentró de 13.7 a 28.5 °Bx. Otros parámetros cualitativos como antocianinas totales, compuestos fenólicos y TAA aumentaron en un 106 %, 69 %, 104 % y 155 %, respectivamente, en comparación con el jugo original.	Gurak <i>et al.</i> , 2010

Tabla II. Jugos de fruta filtrados con membranas en diferentes procesos (continuación)

Bebida	Proceso utilizado	Resultados	Referencia
Jugo de papaya	UF	Se probaron dos membranas, de PES y PS. El mejor rendimiento lo obtuvo M2 a 1 bar de presión. La retención de licopeno fue superior al 99 %, los sólidos totales se redujeron en más del 16 %. Los resultados indicaron que el licopeno, valioso antioxidante, sería un subproducto.	Paes <i>et al.</i> , 2015
Jugo de melón	MF	Cambio insignificante en pH, densidad, acidez y ácido ascórbico en comparación con el jugo original. Los TSS, la viscosidad y el contenido de licopeno se redujeron en un 9.5 %, 11.5 % y 67 %, respectivamente. La claridad de la muestra se incrementó drásticamente del 1.6 % a más del 98 %. El jugo filtrado se almacenó durante 20 días sin ninguna degradación.	Chhaya <i>et al.</i> , 2008

MF - Microfiltración, UF - Ultrafiltración, NF - Nanofiltración, RO - Ósmosis inversa.

Cassano *et al.* (2015) compararon la concentración de jugo de naranja por evaporación y otros procesos basados en membranas. El jugo concentrado por evaporación se caracterizó por una disminución de actividad antioxidante total (*total antioxidant activity*, TAA) en comparación con el jugo fresco. En UF, tanto el permeado como el retenido mantuvieron su TAA, mientras que el jugo procesado por RO presentó una pequeña disminución en TAA. Se reportó también que procesar el jugo mediante destilación osmótica (*osmotic distillation*, OD) después de RO, como un paso de concentración, no condujo a ninguna pérdida significativa en TAA del jugo (Cassano *et al.*, 2007).

Dincer *et al.* (2016) seleccionaron jugo de morera negra para evaluar el efecto del proceso de evaporación térmica (*thermal evaporation*, TE) convencional y la destilación osmótica para la concentración y el almacenamiento del jugo. Dichos autores examinaron los parámetros de calidad como pH, turbidez, acidez titulable, color, TAA, fitonutrientes, componentes

bioactivos y contenido volátil del jugo tratado. Los resultados revelaron que la muestra procesada por OD posee un mayor contenido de antocianinas y compuestos volátiles en comparación con los concentrados por TE. El contenido de antocianinas se redujo en un 6.5 % después de la OD, mientras que esta reducción fue de más del 16 % después de la TE. No se observó una diferencia significativa para la turbidez, el pH y la acidez titulable después de ambos procesos. También se encontró que los parámetros de calidad del concentrado producido por OD fueron favorables durante el almacenamiento a baja temperatura. Sus resultados sugieren que el uso OD es recomendable para preservar los compuestos sensibles al calor del concentrado de jugo de morera negra que conducen a un producto de alta calidad.

En el procesamiento de la melaza de caña de azúcar se realiza la purificación del jugo, en esta etapa se recuperan azúcares, teniendo en cuenta que los pigmentos, las sales inorgánicas, la sacarosa y el azúcar reductor son los componentes principales

de la melaza de caña. En los tratamientos convencionales se requieren tres operaciones que incluyen decoloración, desalinización y fraccionamiento de azúcar para recuperar los azúcares. En el estudio de Luo *et al.*, (2018) se utilizó nanofiltración (NF) para la separación de sacarosa y azúcar reductor en melaza de caña, mediante un proceso de diafiltración-concentración en cascada, encontrando que el contenido de azúcar reductor en melaza disminuye de 23 % a 2 %.

2.4. Recuperación de componentes bioactivos presentes en jugos

Los alimentos caracterizados por su potencial protector y promotor de la salud, además de su valor nutritivo, se reconocen como alimentos funcionales. Sus componentes benéficos han sido denominados con diversos términos, como fitoquímicos, componentes funcionales y componentes bioactivos. Estos componentes pueden ejercer sus efectos actuando como antioxidantes, activando enzimas de desintoxicación del hígado, bloqueando la actividad de toxinas bacterianas o virales, inhibiendo la absorción de colesterol, disminuyendo la agregación plaquetaria o destruyendo bacterias gastrointestinales dañinas (Amorim *et al.*, 2016).

Cassano *et al.* (2007) estudiaron la influencia de la ultrafiltración (UF) en la concentración de compuestos bioactivos del jugo de kiwi, con el fin de desarrollar un producto natural que pueda usarse para fortificar alimentos y bebidas. Al mismo tiempo, se investigó el efecto de la presión transmembrana (TMP) y la temperatura en el flujo de permeado para identificar las condiciones operativas óptimas para el procesamiento del jugo. Se obtuvo un valor TMP óptimo entre 0.6 y 0.65 bar en diferentes condiciones de velocidades de flujo cruzado, y encontraron que los flujos de permeado en estado estacionario aumentaron linealmente con la temperatura en el rango de 20 a 30 °C.

El jugo de kiwi se clarificó en condiciones óptimas de operación, según el modo de concentración del lote, hasta un factor

de reducción de volumen final (VRF) de 2.76. Los análisis de la reducción del flujo, según los modelos de ensuciamiento reportados en la literatura, revelaron que la causa principal del ensuciamiento de la membrana es la formación de una capa de torta que cubre toda su superficie. La mayoría de los compuestos bioactivos del jugo de kiwi despectinizado se recuperaron en la fracción clarificada del proceso de UF. El rechazo de la membrana para UF hacia los fenoles totales fue del 13 % (Cassano *et al.*, 2007).

Arend *et al.* (2017) evaluaron el desempeño de una membrana de PVDF ND de 150-300 Da en la concentración de compuestos bioactivos de jugo de fresa natural y microfiltrado. Se midieron flujos de permeado más altos (4.0 L/m²h) para el jugo sin filtrar en comparación con el jugo clarificado (3.0 L/m²h); sin embargo, se observó una reducción menos pronunciada del flujo de permeado para el jugo microfiltrado debido a la ausencia de sólidos en suspensión. La actividad antioxidante de las muestras concentradas a VRF de 2.0 presentó un incremento de 99 % y 51 % para el jugo sin tratar y clarificado, respectivamente.

2.5. Clarificación de jugos

Hasta la fecha, la principal aplicación de la tecnología de membranas a la industria de los jugos de frutas ha sido la clarificación. Hay varios tipos de equipos disponibles para llevar a cabo los procesos asociados. UF y MF permiten la combinación de pasos de clarificación y filtración para clarificar jugos de frutas como manzana, pera, arándano, uva y cítricos (Conidi *et al.*, 2020).

La clarificación es un proceso mediante el cual la emulsión semiestable de carbohidratos vegetales coloidales que soportan el material de nube insoluble de un jugo recién exprimido se «rompe», de tal manera que la viscosidad disminuye y la opacidad del jugo turbio cambia a una apariencia manchada abierta (Sinha, 2012).

Esto se puede lograr de dos formas generales: enzimática y no enzimáticamente. El tratamiento térmico del jugo se

puede minimizar y el jugo se puede esterilizar en frío mediante un procesamiento con membranas y envasado asépticos. La filtración por membrana también puede ser continua y automatizada, lo que reduce costos de capital y mano de obra (reducción de tanques) y minimiza los tiempos de puesta en marcha (Mierczynska-Vasilev y Smith, 2015).

Las ventajas de UF y MF para procesos de clarificación sobre el procesamiento tradicional incluyen la producción de un jugo claro y la retención de enzimas por la membrana, dependiendo del tamaño del poro. Las enzimas de despectinización se pueden retener, así como la polifenoloxidasa (PPO), que provoca el pardeamiento enzimático (Urkiaga *et al.*, 2002).

En el estudio de Udayakumar *et al.* (2020) se presenta la eficiencia de diferentes filtros de membrana utilizados en la clarificación del jugo de uva. Se compararon varias membranas como Whatman 41, Whatman 1, membrana de nailon, membrana de difluoruro de polivinilideno (PVDF) contra una membrana de nanofibras electrohilada. El uso de estas membranas mostró una gran diferencia en el valor físico, químico, biológico y nutricional del jugo de uva. Los autores concluyen que la membrana de nanofibra electrohilada operada al vacío fue más eficiente en comparación con los filtros de membrana microporosa de PVDF y nailon, pues el jugo retuvo sus propiedades visibles y bioactivas y también conduce a una reducción en la formación de sedimentos en las muestras.

3. Tecnologías de filtrado emergentes y nuevas aplicaciones

A lo largo de los años la filtración por membrana o filtro se ha abierto camino en el tratamiento de bebidas; a continuación, se presentan algunas de las nuevas tecnologías y aplicaciones de procesos de filtración que tienen la finalidad de controlar parámetros como el aroma o el sabor; analizar compuestos presentes como parte del control de riesgos y calidad, como el contenido de microplásticos; y ofrecer alternativas a tratamientos térmicos con

la esterilización en frío de bebidas para la eliminación de agentes patógenos (Blackburn y Green, 2021; Jiménez-Sánchez *et al.*, 2016; Lamdande *et al.*, 2020; Madaeni y Pourghorbani, 2013; Salgado *et al.*, 2017). Los materiales funcionalizados se han desarrollado en los últimos años, y las aplicaciones en la industria alimentaria se centran principalmente en empaques, aquí se describen algunos estudios que utilizan materiales funcionalizados en filtros y membranas para el tratamiento de bebidas (Peña-Gómez *et al.*, 2019; Ruiz-Rico y Barat, 2021; Saeed *et al.*, 2019).

3.1. Mejora del aroma y sabor

Los sabores y las fragancias son simplemente una amplia gama de compuestos químicos, incluidas varias moléculas como n-alcanos y alquenos de cadena corta, alcoholes, aldehídos, cetonas, ésteres, lactonas y tioles, entre otros ácidos orgánicos. En especial, existe un interés particular hacia los terpenos, que son reconocidos como la categoría más abundante de sustancias químicas en la naturaleza, siendo responsables de los olores primarios en las plantas (flores) y varias frutas (Castro-Muñoz, 2019).

La extracción convencional de fuentes naturales para producir aromas implica técnicas de separación químicas o físicas, como la destilación, la extracción mediante fluidos supercríticos, la adsorción, procesos asistidos por microondas, la extracción por solventes y los procesos de filtración con membrana (Castro-Enríquez *et al.*, 2020). Independientemente de la factibilidad de uso de todas estas técnicas, hay un aspecto importante a considerar: su eficiencia. Debido a que la mayoría de los aromas presenta reactividad (formación de radicales o compuestos oxidativos) y baja estabilidad (degradación térmica e hidrólisis) cuando se utilizan fases acuosas o solventes, los rendimientos y eficiencias de recuperación son limitados (Castro-Muñoz, 2019).

A lo largo de los años, se ha planteado el uso de la pervaporación como técnica alternativa para la recuperación de los compuestos aromáticos de las corrientes acuosas de alimentos. El enfoque actual de la investigación sobre esta técnica en la recupe-

ración del aroma está en la optimización de las condiciones de operación y en la síntesis de nuevos materiales, con el objetivo de mejorar su selectividad sobre componentes específicos durante el proceso (Saffarionpour y Ottens, 2018).

En el estudio de Sakamoto *et al.* (2003), se evalúa la recuperación diferencial de hidrocarburos terpénicos no polares y compuestos oxigenados acuosos de condensados producidos como subproducto durante la concentración de jugos de cítricos, utilizando membranas de zirconio. Los hidrocarburos terpénicos no polares se retuvieron mientras que los compuestos de sabor oxigenados más polares pasaban a través de la membrana, los porcentajes de alcoholes, ésteres y aldehídos en el permeado aumentaron notablemente en comparación con sus porcentajes antes de la filtración.

Salgado *et al.* (2017) estudiaron el rendimiento de una combinación de pervaporación (PV) y nanofiltración (NF) a escala de planta piloto para la elaboración de un vino blanco de bajo contenido alcohólico sin pérdidas de sabor. Utilizan un proceso NF de dos etapas para la reducción de azúcar del mosto, seguido de PV para la recuperación de los precursores del aroma del mosto de uva. El perfil aromático reveló que la mezcla de mostos del proceso PV más NF tuvo un contenido de aromas similar al mosto original.

En el artículo de Dawiec-Liśniewska *et al.* (2018) se evalúa la efectividad de la separación de hidrolatos de jugo de frutas (ciruela, manzana, grosella negra y cereza) a escala de laboratorio (sistema de pervaporación de flujo de gas inerte) y semitécnica (sistema de pervaporación de vacío). Para crear matrices precisas de hidrolatos antes y después de la pervaporación para cada uno de los sistemas separados, se aplicó la técnica de microextracción en fase sólida (SPME) y la cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC-MS). El análisis sensorial confirmó la mejora de la nota aromática de los permeados concentrados en comparación con las soluciones de hidrolatos de la alimentación. Los resultados indicaron que la pervaporación se puede aplicar en la condensación de agua aromática o hidrolato de jugo de frutas, lo que puede mejorar significativamente la calidad del producto y prolongar la vida útil.

3.2. Análisis de micro plásticos en botellas

Actualmente, no existe una definición generalmente aceptada para microplásticos o partículas microplásticas (MP). Sin embargo, según la ISO/TR 21960, se definen como microplásticos aquellos

en el rango de 1 a 1000 μm . Los métodos analíticos existentes se centran en la determinación del número de partículas, lo que requiere herramientas de muestreo elaboradas, infraestructura de laboratorio y, en general, métodos de detección de imágenes que consumen mucho tiempo (Braun *et al.*, 2021). Estos compuestos se han observado en varias matrices ambientales (Alimi *et al.*, 2018; Bergmann *et al.*, 2019; Horton *et al.*, 2017), incluidas aguas subterráneas o potables (Mintenig *et al.*, 2019), en biota y alimentos (Fadare *et al.*, 2020; Shruti *et al.*, 2020), productos del mar (Dehaut *et al.*, 2016), agua o bebidas embotelladas (Welle y Franz, 2018). El análisis de MP en agua embotellada de plástico y otras bebidas es un tema de creciente preocupación para el análisis de alimentos (Völker *et al.*, 2020).

Hasta la fecha, hay una investigación limitada sobre los efectos de los microplásticos directamente en la salud humana. Los resultados de estudios correlativos en personas expuestas a altas concentraciones de microplásticos, experimentos con animales modelo y cultivos celulares (Blackburn y Green, 2021) sugieren que en todos los sistemas biológicos, la exposición a microplásticos puede causar toxicidad de partículas, con estrés oxidativo, lesiones inflamatorias y aumento de la absorción o translocación; la incapacidad del sistema inmune para eliminar las partículas sintéticas puede provocar una inflamación crónica y un mayor riesgo de neoplasia; además, los microplásticos pueden liberar sus componentes, contaminantes adsorbidos y organismos patógenos (Blackburn y Green, 2021; Prata *et al.*, 2020).

Oßmann *et al.* (2018) analizaron muestras de agua mineral embotellada para determinar las concentraciones de partículas de microplásticos, utilizando filtros de membrana de 0.4 μm y espectroscopia micro-Raman. El recuento promedio de microplásticos en agua mineral fue de 2,649 partículas/L en botellas de PET de un solo uso, 4,889 partículas/L en botellas de PET reutilizable y entre 3,074 y 6,292 partículas/L en botellas de vidrio. Mientras que en las botellas de plástico el tipo de polímero predominante era el PET, en las botellas de vidrio se encontraron varios polímeros como el PE o el copolímero de estireno-butadieno.

Todavía no es posible realizar un análisis rutinario completo de MP en los productos alimenticios. En el trabajo de Braun *et al.* (2021) se presentó el desarrollo de un crisol filtrante inteligente como herramienta de muestreo y detección. Después de la filtración y el secado de los sólidos filtrados, se puede realizar una determinación directa del contenido de masa de MP de la mues-

tra en el crisol mediante espectroscopía de masas por cromatografía de gases con desorción por extracción térmica (TED-GC/MS). El nuevo crisol de filtro permite una filtración de MP hasta tamaños de partículas de 5 μm , lo cual les permitió determinar contenidos de MP por debajo de 0.01 $\mu\text{g/L}$ hasta 2 $\mu\text{g/L}$, dependiendo del tipo de botella. Esto puede estar directamente relacionado con el tipo de botella, especialmente con la calidad del material plástico del tapón de rosca. Dependiendo del material plástico, la formación de partículas aumenta debido a las operaciones de apertura y cierre durante el uso.

3.3. Esterilización en frío

La esterilización en frío por sistemas basados en membranas ha dado lugar a una nueva técnica de conservación de jugos. El jugo puede tener una vida útil prolongada sin conservadores ni aditivos que mantengan su sabor, olor y perfil nutricional. Este tipo de jugos tienen una gran demanda por parte de los consumidores. En general, varios sistemas de separación basados en membranas han demostrado su potencial en la industria de bebidas (Charcosset, 2020).

La leche recolectada en plantas lecheras presenta el riesgo de contener bacterias patógenas para humanos como *Listeria*, *Brucella*, *Mycobacterium* o *Salmonella* (Saboya *et al.*, 2000). Por lo tanto, se debe lograr la reducción de bacterias y esporas, sin cambiar la funcionalidad de las proteínas de la leche (Ding *et al.*, 2016). Actualmente se utiliza la MF en la industria láctea para la eliminación de bacterias y esporas, ya que reduce la cantidad de estos microorganismos sin afectar el sabor, y brinda una vida útil más prolongada que la pasteurización. Se ha reportado que los factores de reducción decimal por MF son más altos que por bactofugación (Charcosset, 2021).

Griep *et al.* (2018) demostraron que las características de la superficie de la membrana pueden afectar la retención de esporas, debido a sus dimensiones, observando que es preferible utilizar una membrana con un poro de 1.2 μm , en lugar del tamaño tradicional de 1.4 μm . Sin embargo, este tamaño de poro puede conducir a una mayor retención de micelas de caseína, lo que provoca una disminución en la concentración de proteína de la leche y también un mayor ensuciamiento de la membrana.

En otro estudio de Lamdande *et al.* (2020) se plantea el tratamiento con membranas como un método limpio, ecológico y energéticamente eficiente para la esterilización en frío del agua de

coco tierna (TCW). El flujo de permeado se evaluó en función de diferentes mecanismos de ensuciamiento. Se observó que la carga microbiana de TCW después de la ultrafiltración disminuyó de 4.16 a 0.0 log UFC/mL, logrando la esterilización en frío. La calidad sensorial del TCW ultrafiltrado se mantuvo por un periodo de almacenamiento de tres meses con recuento cero en crecimiento microbiano.

3.4. Filtros funcionalizados

Se ha demostrado que la tecnología de filtración es una excelente alternativa, pero los materiales a menudo tienen problemas de ensuciamiento y deben usarse en combinación o en secuencia con otros tratamientos para lograr un mejor rendimiento. El ensuciamiento causado por coloides, productos químicos y microbios rechazados exige una atención considerable porque puede resultar en una mayor demanda de energía, una limpieza costosa y el reemplazo frecuente de los filtros (Thomas y Alcantar, 2017).

Debido a lo anterior, el desarrollo de materiales mejorados, seguros y estables que permitan una eliminación microbiana rápida y eficaz es de gran interés. En este sentido, la funcionalización de la superficie de los materiales filtrantes disponibles puede ser un enfoque clave. Para ello, la selección de los siguientes parámetros es crucial: el material adecuado en términos de granulometría y características superficiales, propiedades antimicrobianas y seguridad del compuesto inmovilizado, biocompatibilidad tanto del soporte como de la molécula bioactiva, y fácil procedimiento de funcionalización (Thomas y Alcantar, 2017; Zhang *et al.*, 2011). La optimización de estos puntos clave podría garantizar el correcto desarrollo de los soportes antimicrobianos (Indumathi *et al.*, 2019).

Los agentes antimicrobianos son compuestos químicos que pueden inhibir el crecimiento o inactivar microorganismos (Buckow *et al.*, 2009). Según su origen, los antimicrobianos utilizados en la industria alimentaria se pueden clasificar en conservadores artificiales o sintéticos y conservadores naturales. Algunos de los conservadores antimicrobianos artificiales más comunes son los benzoatos, sorbatos, propionatos y nitratos, mientras que los compuestos antimicrobianos de origen natural incluyen bacteriocinas basadas en microorganismos, enzimas animales, polímeros o ácidos grasos y metabolitos vegetales como ácidos grasos o compuestos fenólicos (Peña-Gómez, Ruiz-Rico, Pérez-Esteve *et al.*, 2019).

La mayoría de las aplicaciones propuestas basadas en soportes modificados se han utilizado para el diseño de sistemas de desinfección de agua en el punto de uso. La celulosa (filtros comerciales, papel secante absorbente y fibras de algodón) ha sido el material por excelencia para el anclaje de nanopartículas de plata. En varios estudios se han aplicado diferentes mecanismos de inmovilización, como la impregnación (Oyanedel-

Craver y Smith, 2007), la deposición por reducción *in situ* de nitrato de plata sobre las fibras de celulosa (Dankovich y Gray, 2011), o injerto covalente con soportes celulósicos previamente modificados en la superficie (Artés-Hernández *et al.*, 2021). En algunos de ellos, puede presentarse una liberación de plata (Ag) en contacto con el agua; sin embargo, el uso de soportes celulósicos funcionalizados covalentemente con nanopartícu-

Tabla III. Soportes funcionalizados con diferentes compuestos

Soporte	Agente antimicrobiano inmovilizado	Microorganismo evaluado	Sistema evaluado	Resultado	Referencia
Perlas de quitosano	Lisozima de clara de huevo	<i>Oenococcus oeni</i>	Vino blanco	Actividad antimicrobiana pero no actividad enzimática.	Liburdi <i>et al.</i> , 2016
Halloysita	ZnO NP y CeO ₂ NP	<i>E. coli</i>	<i>In vitro</i>	Se inhibe eficazmente el crecimiento, la propagación y la supervivencia bacterianos.	Shu <i>et al.</i> , 2017
Nanofibra de acetato de celulosa	Ag NP en TiO ₂ NP	<i>E. coli</i> y <i>S. aureus</i>	<i>In vitro</i>	Actividad antibacterial por 36 horas.	Jatoi <i>et al.</i> , 2019
Nanofibras de CA, PAN, PVP	AgNO ₃ NP	<i>E. coli</i> y <i>P. aeruginosa</i>	<i>In vitro</i>	Mayor actividad antimicrobiana en nanofibras de PAN.	Lala <i>et al.</i> , 2007
Nanofibras de celulosa aniónica	Ag y Ag NP	<i>S. aureus</i> y <i>E. coli</i>	Sistema modelo	Mayor actividad antimicrobiana con Ag.	Gopiraman <i>et al.</i> , 2016
Sílice pirógena, sílice amorfa y micropartículas de sílice mesoporosa	Carvacrol, eugenol, timol y vainillina	<i>S. aureus</i> , <i>L. innocua</i> y <i>E. coli</i>	<i>In vitro</i> e <i>in situ</i> (aditivo conservador en leche)	Reducción del crecimiento microbiano en 1.5 ciclos logarítmicos en el día tres de incubación.	Ruiz-Rico <i>et al.</i> , 2017
Nanofibras de celulosa	Amino silanos	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>S. aureus</i> y <i>E. coli</i>	<i>In vitro</i>	Restringir completamente el crecimiento bacteriano después de 24 horas con bacterias <i>Gram</i> -positivas.	Saini <i>et al.</i> , 2017

ZnO NP - nanopartículas de dióxido de zinc, CeO₂ NP - nanopartículas de óxido de cerio, Ag NP - nanopartículas de plata, TiO₂ NP - nanopartículas de dióxido de titanio, AgNO₃ NP - nanopartículas de nitrato de plata, Ag - plata, CA - acetato de celulosa, PAN - poliacrilonitrilo, PVP-poli (N-vinilpirrolidona).

las de Ag previene la liberación del compuesto inmovilizado y ha mostrado actividad antimicrobiana contra *Escherichia coli* después de filtrar agua contaminada (Sinclair *et al.*, 2014). Además, los materiales de celulosa han demostrado su capacidad para cargarse electrostáticamente. Esta celulosa modificada se aplicó en un sistema de purificación portátil para obtener agua potable. Específicamente, las fibras de pulpa de madera blanca y el papel de filtro de café se funcionalizaron con polielectrolitos, y las bacterias dispersas en agua se adsorbieron en las fibras de celulosa, las cuales pudieron eliminar más del 99.9 % de *E. coli* presente (Saffarionpour y Ottens, 2018).

En otro estudio, un filtro de agua empacado con gasas de algodón se revistió con quitosano usando un proceso de curado por UV o se cationizó mediante la introducción de grupos de amonio cuaternario. Los materiales mostraron una buena actividad antibacteriana contra *E. coli*, *Staphylococcus aureus* y *K. pneumoniae* (Ferrero *et al.*, 2014). En un segundo intento, se desarrolló un filtro de agua para la desinfección biológica contra bacterias *Gram* positivas, lo que resultó en una buena actividad antibacteriana. Sin embargo, se observó una liberación parcial de quitosano injertado, aunque el flujo de agua redujo la cantidad de quitosano lixiviado (Truffa-Giachet *et al.*, 2018). Otros ejemplos de materiales funcionalizados con agentes antimicrobianos se observan en la tabla III, junto con los materiales de soporte utilizados, el agente antimicrobiano y la matriz a evaluar.

Como otro material polimérico funcionalizado con compuestos bioactivos, Cappannella *et al.* (2016) estudiaron la capacidad de la lisozima inmovilizada sobre el material de quitosano para conservar el vino y evitar la posible reacción alérgica derivada de la presencia de la enzima libre. Se inmovilizó covalentemente lisozima sobre soportes esféricos de quitosano para desarrollar un sistema de eliminación de bacterias lácticas en vino blanco y tinto mediante lisis enzimática. Las partículas se colocaron en un reactor de lecho fluidizado para permitir el flujo de los sustratos, obteniendo una alta superficie de contacto. Los

resultados mostraron que la lisozima inmovilizada producía una mayor lisis de ácido láctico que la forma libre.

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Los procesos de filtración, presentes en la industria de alimentos, han evolucionado a lo largo de varias décadas, desde la filtración con arena hasta el desarrollo de nuevos materiales con características muy específicas para una función determinada, como las membranas de ósmosis inversa para la recuperación de agua potable.

Actualmente podemos sintetizar materiales con un tamaño de poro, dureza, permeabilidad o cualquier otra propiedad muy específica, lo que falta ahora es evaluar la factibilidad y alcance de la aplicación de estos nuevos materiales, analizar si su uso es económicamente viable a gran escala y si el uso de filtros avanzados en conjunto con otras tecnologías puede llegar o no a sustituir algunos de los procesos en la industria de las bebidas tal y como los conocemos en la actualidad.

Una tendencia actual es la de buscar productos o alimentos mínimamente procesados y no utilizar conservadores sintéticos, es por ello que el estudio de tecnologías como la filtración con materiales funcionalizados se abre paso con fuerza, pues plantea la posibilidad de obtener alimentos microbiológicamente seguros, manteniendo sus componentes bioactivos y propiedades sensoriales.

AGRADECIMIENTOS

La autora R. Hernández-López agradece a la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) por el financiamiento de sus estudios de posgrado.

REFERENCIAS

- Alimi, O. S., Farner-Budarz, J., Hernandez, L. M. y Tufenkji, N. (2018). Microplastics and Nanoplastics in Aquatic Environments: Aggregation, Deposition, and Enhanced Contaminant Transport. *Environmental Science and Technology*, 52(4), 1704-1724.
- Amorim, M., Pereira, J. O., Gomes, D., Pereira, C. D., Pinheiro, H. y Pintado, M. (2016). Nutritional ingredients from spent brewer's yeast obtained by hydrolysis and selective membrane filtration integrated in a pilot process. *Journal of Food Engineering*, 185, 42-47. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.03.032>
- Arend, G. D., Adorno, W. T., Rezzadori, K., Di Luccio, M., Chaves, V. C., Reginatto, F. H. y Petrus, J. C. C. (2017a). Concentration of phenolic compounds from strawberry (*Fragaria X ananassa Duch*) juice by nanofiltration membrane. *Journal of Food Engineering*, 201, 36-41. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.01.014>
- Arend, G. D., Adorno, W. T., Rezzadori, K., Di Luccio, M., Chaves, V. C., Reginatto, F. H. y Petrus, J. C. C. (2017b). Concentration of phenolic compounds from strawberry (*Fragaria X ananassa Duch*) juice by nanofiltration membrane. *Journal of Food Engineering*, 201, 36-41. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.01.014>
- Arend, G. D., Rezzadori, K., Soares, L. S. y Petrus, J. C. C. (2019). Performance of nanofiltration process during concentration of strawberry juice. *Journal of Food Science and Technology*, 56(4), 2312-2319. <https://doi.org/10.1007/S13197-019-03659-7>
- Artés-Hernández, F., Robles, P. A., Gómez, P. A., Tomás-Callejas, A., Artés, F. y Martínez-Hernández, G. B. (2021). Quality Changes of Fresh-Cut Watermelon During Storage as Affected by Cut Intensity and uv-c Pre-treatment. *Food and Bioprocess Technology*, 14(3), 505-517.
- Arthanareeswaran, G., Sriyamuna Devi, T. K. y Raajenthiren, M. (2008). Effect of silica particles on cellulose acetate blend ultrafiltration membranes: Part I. *Separation and Purification Technology*, 64(1), 38-47. <https://doi.org/10.1016/j.SEPUR.2008.08.010>
- Barbosa-Ríos, J. A., Castellón-Jardón, J., Guadarrama-Lezama, A. Y., Alvarez-Ramirez, J., Meraz, M. y Carrillo-Navas, H. (2018). Effect of new generation enzymes addition on the physical, viscoelastic and textural properties of traditional Mexican sweet bread. *Journal of Cereal Science*, 79, 160-167. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.10.012>
- Barboza, L. G. A., DickVethaak, A., Lavorante, B. R. B. O., Lundebye, A. K. y Guilhermino, L. (2018). Marine microplastic debris: An emerging issue for food security, food safety and human health. *Marine Pollution Bulletin*, 133, 336-348. <https://doi.org/10.1016/j.MARPOLBUL.2018.05.047>
- Barrows, C. y Robinson, M. (2018). Food and Beverage. En *Club Management* (p. 755). <https://doi.org/10.23912/9781911635062-3976>
- Bergmann, M., Mützel, S., Primpke, S., Tekman, M. B., Trachsel, J. y Gerdtz, G. (2019). White and wonderful? Microplastics prevail in snow from the Alps to the Arctic. *Science Advances*, 5(8).
- Bhat, B., Gupta, M., Andrabi, S. T. y Bajaj, B. K. (2017). *Growth and viability of probiotic Weissella kimchi R-3 in fruit and vegetable beverages*.
- Bhattacharjee, C., Saxena, V. K. y Dutta, S. (2017). Fruit juice processing using membrane technology: A review. En *Innovative Food Science and Emerging Technologies* (vol. 43, pp. 136-153). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.08.002>
- Blackburn, K. y Green, D. (2021). The potential effects of microplastics on human health: What is known and what is unknown. *Ambio* 2021, 51(3), 518-530. <https://doi.org/10.1007/S13280-021-01589-9>
- Bortolassi, A. C. C., Guerra, V. G. y Aguiar, M. L. (2017). Characterization and evaluate the efficiency of different filter media in removing nanoparticles. *Separation and Purification Technology*, 175, 79-86. <https://doi.org/10.1016/j.SEPUR.2016.11.010>
- Braun, U., Altmann, K., Herper, D., Knefel, M., Bednarz, M. y Bannick, C. G. (2021). Smart filters for the analysis of microplastic in beverages filled in plastic bottles. *Food Additives and Contaminants - Part A Chemistry, Analysis, Control, Exposure and Risk Assessment*, 38(4), 691-700. <https://doi.org/10.1080/19440049.2021.1889042>
- Buckow, R., Weiss, U. y Knorr, D. (2009). Inactivation kinetics of apple polyphenol oxidase in different pressure-temperature domains. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 10(4), 441-448. <https://doi.org/10.1016/j.IFSET.2009.05.005>

- Buglass, A. J. (2010). Handbook of Alcoholic Beverages: Technical, Analytical and Nutritional Aspects. *Handbook of Alcoholic Beverages: Technical, Analytical and Nutritional Aspects*, 1-2. <https://doi.org/10.1002/9780470976524>
- Cappannella, E., Benucci, I., Lombardelli, C., Liburdi, K., Bavaro, T. y Esti, M. (2016). Immobilized lysozyme for the continuous lysis of lactic bacteria in wine: Bench-scale fluidized-bed reactor study. *Food Chemistry*, 210, 49-55. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.04.089>
- Cassano, A., Donato, L. y Drioli, E. (2007). Ultrafiltration of kiwifruit juice: Operating parameters, juice quality and membrane fouling. *Journal of Food Engineering*, 79(2), 613-621. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.02.020>
- Cassano, Al., Rastogi, N. K. y Basile, A. (2015). Membrane technologies for water treatment and reuse in the food and beverage industries. En *Advances in Membrane Technologies for Water Treatment: Materials, Processes and Applications* (pp. 551-580). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-121-4.00018-6>
- Castro-Enríquez, D. D., Montaña-Leyva, B., Del Toro-Sánchez, C. L., Juárez-Onofre, J. E., Carvajal-Millán, E., López-Ahumada, G. A., Barreras-Urbina, C. G., Tapia-Hernández, J. A. y Rodríguez-Félix, F. (2020). Effect of Ultrafiltration of Pitaya Extract (*Stenocereus thurberi*) on Its Phytochemical Content, Antioxidant Capacity, and UPLC-DAD-MS Profile. *Molecules* 2020, Vol. 25, Page 281, 25(2), 281. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES25020281>
- Castro-Muñoz, R. (2019). Pervaporation: The emerging technique for extracting aroma compounds from food systems. *Journal of Food Engineering*, 253, 27-39. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.02.013>
- Castro-Muñoz, R. (2020). The strategy of nanomaterials in polymeric membranes for water treatment: Nanocomposite membranes / La estrategia de los nanomateriales en membranas poliméricas para el tratamiento de agua: membranas nanocompuestas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 11(1), 410-436.
- Charcosset, C. (2020). Classical and recent applications of membrane processes in the food industry. *Food Engineering Reviews*, 13(2), 322-343. <https://doi.org/10.1007/S12393-020-09262-9>
- Charcosset, C. (2021). Classical and recent applications of membrane processes in the food industry. *Food Engineering Reviews*, 13(2), 322-343.
- Chemat, F., Rombaut, N., Meullemiestre, A., Turk, M., Perino, S., Fabiano-Tixier, A. S. y Abert-Vian, M. (2017). Review of Green Food Processing techniques. Preservation, transformation, and extraction. En *Innovative Food Science and Emerging Technologies* (vol. 41, pp. 357-377). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.04.016>
- Chhaya, C., Rai, P., Majumdar, G. C., Dasgupta, S. y De, S. (2008). Clarification of watermelon (*Citrullus lanatus*) juice by microfiltration. *Journal of Food Process Engineering*, 31(6), 768-782. <https://doi.org/10.1111/J.1745-4530.2007.00188.X>
- Choi, I., Yoo, D. S., Chang, Y., Kim, S. Y. y Han, J. (2021). Polycaprolactone film functionalized with bacteriophage T4 promotes antibacterial activity of food packaging toward *Escherichia coli*. *Food Chemistry*, 346, 128883. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128883>
- Conidi, C., Drioli, E. y Cassano, A. (2020). Perspective of membrane technology in pomegranate juice processing: A review. En *Foods* (vol. 9, número 7, p. 889). Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/foods9070889>
- Cristóvão, R. O., Botelho, C. M., Martins, R. J. E., Loureiro, J. M. y Boaventura, R. A. R. (2015). Fish canning industry wastewater treatment for water reuse - a case study. *Journal of Cleaner Production*, 87(1), 603-612. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.076>
- Crowley, S. V., Gazi, I., Kelly, A. L., Huppertz, T. y O'Mahony, J. A. (2014). Influence of protein concentration on the physical characteristics and flow properties of milk protein concentrate powders. *Journal of Food Engineering*, 135, 31-38. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.03.005>
- Crowley, S. V., O'Callaghan, T. F., Kelly, A. L., Fenelon, M. A. y O'Mahony, J. A. (2015). Use of ultrafiltration to prepare a novel permeate for application in the functionality testing of infant formula ingredients. *Separation and Purification Technology*, 141, 294-300. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.11.047>
- Cuthbert, T. J., Ennis, S., Musolino, S. F., Buckley, H. L., Niikura, M., Wulff, J. E. y Menon, C. (2021). Covalent functionalization of polypropylene filters with diazirine-photosensitizer conjugates producing visible light driven virus

- inactivating materials. *Scientific Reports* 2021, 11(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98280-6>
- Dankovich, T. A. y Gray, D. G. (2011). Bactericidal Paper Impregnated with Silver Nanoparticles for Point-of-Use Water Treatment. *Environmental Science and Technology*, 45(5), 1992-1998. <https://doi.org/10.1021/ES103302I>
- Dawiec-Liśniewska, A., Szumny, A., Podstawczyk, D. y Witek-Krowiak, A. (2018). Concentration of natural aroma compounds from fruit juice hydrolyates by pervaporation in laboratory and semi-technical scale. Part 1. Base study. *Food Chemistry*, 258, 63-70. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.03.023>
- De Oliveira, R. C., Docê, R. C. y De Barros, S. T. D. (2012). Clarification of passion fruit juice by microfiltration: Analyses of operating parameters, study of membrane fouling and juice quality. *Journal of Food Engineering*, 111(2), 432-439. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.01.021>
- Dehaut, A., Cassone, A. L., Frère, L., Hermabessiere, L., Himber, C., Rinnert, E., Rivière, G., Lambert, C., Soudant, P., Huvet, A., Duflos, G. y Paul-Pont, I. (2016). Microplastics in seafood: Benchmark protocol for their extraction and characterization. *Environmental Pollution*, 215, 223-233. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.05.018>
- Deluhery, J. y Rajagopalan, N. (2008). Use of paramagnetic particles in membrane integrity testing. *Journal of Membrane Science*, 318(1-2), 176-181. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.02.042>
- Devi, R., Alemayehu, E., Singh, V., Kumar, A. y Mengistie, E. (2008). Removal of fluoride, arsenic and coliform bacteria by modified homemade filter media from drinking water. *Bioresource Technology*, 99(7), 2269-2274. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.05.002>
- Dincer, C., Tontul, I. y Topuz, A. (2016). A comparative study of black mulberry juice concentrates by thermal evaporation and osmotic distillation as influenced by storage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 38, 57-64. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.09.012>
- Ding, L., Zhang, W., Ould-Driss, A., Jaffrin, M. Y. y Tang, B. (2016). Concentration of Milk proteins for producing cheese using a shear-enhanced ultrafiltration technique. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 55(42), 11130-11138.
- Echavarría, A. P., Torras, C., Pagán, J. y Ibarz, A. (2011). Fruit Juice Processing and Membrane Technology Application. *Food Engineering Reviews*, 3(3-4), 136-158. <https://doi.org/10.1007/s12393-011-9042-8>
- El Rayess, Y. y Mietton-Peuchot, M. (2016). Membrane technologies in wine industry: an overview. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(12), 2005-2020. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.809566>
- Fadare, O. O., Wan, B., Guo, L. H. y Zhao, L. (2020). Microplastics from consumer plastic food containers: Are we consuming it? *Chemosphere*, 253, 126787. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126787>
- Ferrero, F., Periolatto, M., Vineis, C. y Varesano, A. (2014). Chitosan coated cotton gauze for antibacterial water filtration. *Carbohydrate Polymers*, 103(1), 207-212. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.12.037>
- Gialleli, A. I., Bekatorou, A., Kanellaki, M., Nigam, P. y Koutinas, A. A. (2016). Apple juice preservation through microbial adsorption by nano/micro-tubular cellulose. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 33, 416-421. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.11.006>
- Gopiraman, M., Jatoi, A. W., Hiromichi, S., Yamaguchi, K., Jeon, H. Y., Chung, I. M. y Ick Soo, K. (2016). Silver coated anionic cellulose nanofiber composites for an efficient antimicrobial activity. *Carbohydrate Polymers*, 149, 51-59. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.04.084>
- Griep, E. R., Cheng, Y. y Moraru, C. I. (2018). Efficient removal of spores from skim milk using cold microfiltration: Spore size and surface property considerations. *Journal of Dairy Science*, 101(11), 9703-9713. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14888>
- Guo, H., Wyart, Y., Perot, J., Nauleau, F. y Moulin, P. (2010). Low-pressure membrane integrity tests for drinking water treatment: A review. *Water Research*, 44(1), 41-57. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.09.032>
- Gurak, P. D., Cabral, L. M. C., Rocha-Leão, M. H. M., Matta, V. M. y Freitas, S. P. (2010). Quality evaluation of grape juice concentrated by reverse osmosis. *Journal of Food Engineering*, 96(3), 421-426. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.08.024>
- Horton, A. A., Walton, A., Spurgeon, D. J., Lahive, E. y Svendsen, C. (2017). Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current un-

- derstanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Science of The Total Environment*, 586, 127-141. <https://doi.org/10.1016/j.SCIOTENV.2017.01.190>
- Indumathi, M. P., Saral Sarojini, K. y Rajarajeswari, G. R. (2019). Antimicrobial and biodegradable chitosan/cellulose acetate phthalate/ZnO nano composite films with optimal oxygen permeability and hydrophobicity for extending the shelf life of black grape fruits. *International Journal of Biological Macromolecules*, 132, 1112-1120. <https://doi.org/10.1016/j.IJBIOMAC.2019.03.171>
- Jain, A. y De, S. (2019). Processing of beverages by membranes. *Processing and Sustainability of Beverages*, 517-560. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815259-1.00015-X>
- Jatoi, A. W., Kim, I. S. y Ni, Q. Q. (2019). Cellulose acetate nanofibers embedded with AgNPs anchored TiO₂ nanoparticles for long term excellent antibacterial applications. *Carbohydrate Polymers*, 207, 640-649. <https://doi.org/10.1016/j.CARBPOL.2018.12.029>
- Jiménez-Sánchez, C., Lozano-Sánchez, J., Segura-Carretero, A. y Fernández-Gutiérrez, A. (2016). Alternatives to conventional thermal treatments in fruit-juice processing. Part 2: Effect on composition, phytochemical content, and physicochemical, rheological, and organoleptic properties of fruit juices, 57(3), 637-652. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.914019>
- Källrot, M., Edlund, U. y Albertsson, A. C. (2006). Surface functionalization of degradable polymers by covalent grafting. *Biomaterials*, 27(9), 1788-1796. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.10.010>
- Khalloufi, S., Almeida-Rivera, C. y Bongers, P. (2010). A fundamental approach and its experimental validation to simulate density as a function of moisture content during drying processes. *Journal of Food Engineering*, 97(2), 177-187. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.10.007>
- Khan, S. A. y Shah, L. A. (2021). *Polymer Membranes for Wastewater Treatment*. 175-194. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3164-1_6
- Kotsanopoulos, K. V. y Arvanitoyannis, I. S. (2015). Membrane Processing Technology in the Food Industry: Food Processing, Wastewater Treatment, and Effects on Physical, Microbiological, Organoleptic, and Nutritional Properties of Foods. En *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(9), 1147-1175. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.685992>
- Kumar, M., Tomar, M., Saurabh, V., Mahajan, T., Punia, S., Contreras, M. del M., Rudra, S. G., Kaur, C. y Kennedy, J. F. (2020). Emerging trends in pectin extraction and its anti-microbial functionalization using natural bioactives for application in food packaging. En *Trends in Food Science and Technology* (vol. 105, pp. 223-237). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.009>
- Labban, O., Chong, T. H. y Lienhard, J. H. (2018). Design and modeling of novel low-pressure nanofiltration hollow fiber modules for water softening and desalination pretreatment. *Desalination*, 439, 58-72. <https://doi.org/10.1016/j.DESAL.2018.04.002>
- Lala, N. L., Ramaseshan, R., Bojun, L., Sundarrajan, S., Barhate, R. S., Liu, Y. J. y Ramakrishna, S. (2007). Fabrication of nanofibers with antimicrobial functionality used as filters: protection against bacterial contaminants. *Biotechnology and Bioengineering*, 97(6), 1357-1365. <https://doi.org/10.1002/BIT.21351>
- Lamdande, A. G., Mittal, R. y K. S. M. S., R. (2020). Flux evaluation based on fouling mechanism in acoustic field-assisted ultrafiltration for cold sterilization of tender coconut water. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 61, 102312. <https://doi.org/10.1016/j.IFSET.2020.102312>
- Laorko, A., Tongchitpakdee, S. y Youravong, W. (2015). Economic assessment for cold sterilization and clarification of pineapple juice and coconut water using microfiltration. *Journal of Applied Membrane Science & Technology*, 17(1), 35-46. <https://doi.org/10.11113/AMST.V17I1.13>
- Liburdi, K., Benucci, I., Palumbo, F. y Esti, M. (2016). Lysozyme immobilized on chitosan beads: Kinetic characterization and antimicrobial activity in white wines. *Food Control*, 63, 46-52. <https://doi.org/10.1016/j.FOODCONT.2015.11.015>
- Luo, J., Guo, S., Wu, Y. y Wan, Y. (2018). Separation of sucrose and reducing sugar in cane molasses by nanofiltration. *Food and Bioprocess Technology*, 11(5), 913-925. <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2062-0>
- Macpherson, L. J., Geierstanger, B. H., Viswanath, V., Bandell, M., Eid, S. R., Hwang, S. W., Patapoutian, A. (1977). The pungency of garlic: Activation of TRPA1 and TRPV1 in response to allicin. *British Journal of Anaesthesia*, 107(3), 111070. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2005.04.018>

- Madaeni, S. S. y Pourghorbani, R. (2013). Preparation of PVDF/PES blend membranes for cold sterilization of water and milk. *Advances in Polymer Technology*, 32(S1), E141-E152. <https://doi.org/10.1002/ADV.20278>
- Mangindaan, D., Khoiruddin, K. y Wenten, I. G. (2018). Beverage dealcoholization processes: Past, present, and future. *Trends in Food Science & Technology*, 71, 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.10.018>
- Matta, V. M., Moretti, R. H. y Cabral, L. M. C. (2004). Microfiltration and reverse osmosis for clarification and concentration of acerola juice. *Journal of Food Engineering*, 61(3), 477-482.
- McCabe, W., Smith, J. y Harriott, P. (1991). *Operaciones unitarias en ingeniería química* (4a ed.). McGraw-Hill.
- Medeiros, A. B. P., Pandey, A., Vandenberghe, L. P. S., Pastore, G. M. y Soccol, C. R. (2006). Production and recovery of aroma compounds produced by solid-state fermentation using different adsorbents. *Food Technology and Biotechnology*, 44(1), 47-51.
- Mierczynska-Vasilev, A. y Smith, P. A. (2015). Current state of knowledge and challenges in wine clarification. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 21, 615-626. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12198>
- Ming, C., Xiaomin, X., Philippe, S. y Luc, F. (2021). Extensive review about industrial and laboratory dynamic filtration modules: Scientific production, configurations and performances. *Separation and Purification Technology*, 265 (October 2020), 118293. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118293>
- Mintenig, S. M., Löder, M. G. J., Primpke, S. y Gerdts, G. (2019). Low numbers of microplastics detected in drinking water from ground water sources. *Science of The Total Environment*, 648, 631-635. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.178>
- Nath, K., Dave, H. K. y Patel, T. M. (2018). Revisiting the recent applications of nano-filtration in food processing industries: Progress and prognosis. *Trends in Food Science & Technology*, 73, 12-24. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.01.001>
- Onur, A., Ng, A., Garnier, G. y Batchelor, W. (2018). Engineering cellulose fibre inorganic composites for depth filtration and adsorption. *Separation and Purification Technology*, 203, 209-216. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.04.038>
- Oßmann, B. E., Sarau, G., Holtmannspötter, H., Pischetsrieder, M., Christiansen, S. H. y Dicke, W. (2018). Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. *Water Research*, 141, 307-316. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.027>
- Oyanedel-Craver, V. A. y Smith, J. A. (2007). Sustainable Colloidal-Silver-Impregnated Ceramic Filter for Point-of-Use Water Treatment. *Environmental Science and Technology*, 42(3), 927-933. <https://doi.org/10.1021/ES071268U>
- Paes, J., Da Cunha, C. R. y Viotto, L. A. (2015). Concentration of lycopene in the pulp of papaya (*Carica papaya* L.) by ultrafiltration on a pilot scale. *Food and Bioproducts Processing*, 96, 296-305. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.09.003>
- Pal, P., Kumar, R. y Ghosh, A. K. (2018). Analysis of process intensification and performance assessment for fermentative continuous production of bioethanol in a multi-staged membrane-integrated bioreactor system. *Energy Conversion and Management*, 171, 371-383. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.099>
- Panda, S. K., Bastia, A. K. y Sahoo, G. (2014). Process characteristics and nutritional evaluation of handia - a cereal based ethnic fermented food from odisha. *Indian Journal of Traditional Knowledge*, 13(1), 149-156. <https://www.researchgate.net/publication/286861722>
- Papafotopoulou-Patrinou, E., Gialleli, A. I., Kallis, M., Plessas, S., Alexopoulos, A., Mantzourani, I., Bezirtzoglou, E., Bekatorou, A., Kanellaki, M. y Koutinas, A. A. (2016). Microbiological assessment of tubular cellulose filters used for liquid foods cold pasteurization. *LWT - Food Science and Technology*, 67, 151-158. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.11.016>
- Peña-Gómez, N., Ruiz-Rico, M., Fernández-Segovia, I. y Barat, J. M. (2018). Development of amino-functionalized membranes for removal of microorganism. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 48, 75-82. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.05.023>
- Peña-Gómez, N., Ruiz-Rico, M., Fernández-Segovia, I. y Barat, J. M. (2019). Study of apple juice preservation by filtration through silica microparticles functionalised with essential oil components. *Food Control*, 106. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106749>
- Peña-Gómez, N., Ruiz-Rico, M., Pérez-Esteve, É., Fernández-Segovia, I. y Barat, J. M. (2019). Novel antimicrobial filtering materials based on carvacrol, eugenol, thymol and vanillin immobilized on silica microparticles for water treatment.

- Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 58. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102228>
- Prata, J. C., Da Costa, J. P., Lopes, I., Duarte, A. C. y Rocha-Santos, T. (2020). Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects. En *Science of the Total Environment* (vol. 702, p. 134455). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134455>
- Rascon-Escajeda, L. F., Cruz-Hernandez, M., Rodriguez-Jasso, R. M., Charles-Rodriguez, A. V., Robledo-Olivo, A., Contreras-Esquivel, J. C. y Belmares-Cerda, R. (2018). Discussion between alternative processing and preservation technologies and their application in beverages: A review. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(1), e13322. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13322>
- Rastogi, N. K. (2018). Reverse Osmosis and forward osmosis for the concentration of fruit juices. En *Fruit Juices: Extraction, Composition, Quality and Analysis* (pp. 241-259). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802230-6.00013-8>
- Redan, B. W. (2020). Processing Aids in food and beverage manufacturing: potential source of elemental and trace metal contaminants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(46), 13001-13007. <https://doi.org/10.1021/ACS.JAFC.9B08066>
- Rosária, M., Oliveira, M., Correia, A. C. y Jordão, A. M. (2022). Impact of Cross-Flow and Membrane Plate Filtrations under Winery-Scale Conditions on Phenolic Composition, Chromatic Characteristics and Sensory Profile of Different Red Wines. *Processes*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/pr10020284>
- Ruiz-Rico, M. y Barat, J. M. (2021). Natural antimicrobial-coated supports as filter aids for the microbiological stabilisation of drinks. *LWT*, 147, 111634. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111634>
- Ruiz-Rico, M., Pérez-Esteve, É., Bernardos, A., Sancenón, F., Martínez-Máñez, R., Marcos, M. D. y Barat, J. M. (2017). Enhanced antimicrobial activity of essential oil components immobilized on silica particles. *Food Chemistry*, 233, 228-236. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.118>
- Saboya, L. V. y Maubois, J. L. (2000). Current developments of microfiltration technology in the dairy industry. *Le Lait*, 80(6), 541-553.
- Saeed, F., Afzaal, M., Tufail, T. y Ahmad, A. (2019). Use of natural antimicrobial agents: A safe preservation approach. En *Active Antimicrobial Food Packaging*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80869>
- Saffarionpour, S. y Ottens, M. (2018). Recent Advances in Techniques for Flavor Recovery in Liquid Food Processing. *Food Engineering Reviews*, 10(2), 81-94. <https://doi.org/10.1007/S12393-017-9172-8>
- Saini, S., Belgacem, M. N. y Bras, J. (2017). Effect of variable aminoalkyl chains on chemical grafting of cellulose nanofiber and their antimicrobial activity. *Materials Science and Engineering: C*, 75, 760-768. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.02.062>
- Sakamoto, K., Fujii, K., Inoue, A., Kozuka, H. y Ohta, H. (2003). Differential Recovery of Terpene Hydrocarbons and Oxygenated Compounds from Condensates Containing Essential Oil Discharged during Concentration of Citrus Juices Using a Ceramic Membrane. *Food Science and Technology Research*, 9(1), 11-16. <https://doi.org/10.3136/FSTR9-11>
- Salas, C., Nypelö, T., Rodriguez-Abreu, C., Carrillo, C. y Rojas, O. J. (2014). Nanocellulose properties and applications in colloids and interfaces. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 19(5), 383-396. <https://doi.org/10.1016/j.coi.2014.10.003>
- Salgado, C. M., Fernández-Fernández, E., Palacio, L., Carmona, F. J., Hernández, A. y Prádanos, P. (2017). Application of pervaporation and nanofiltration membrane processes for the elaboration of full flavored low alcohol white wines. *Food and Bioprocess Processing*, 101, 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.10.001>
- Shruti, V. C., Pérez-Guevara, F., Elizalde-Martínez, I. y Kutralam-Muniasamy, G. (2020). First study of its kind on the microplastic contamination of soft drinks, cold tea and energy drinks - Future research and environmental considerations. *Science of The Total Environment*, 726, 138580. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138580>
- Shu, Z., Zhang, Y., Ouyang, J. y Yang, H. (2017). Characterization and synergistic antibacterial properties of ZnO and CeO₂ supported by halloysite. *Applied Surface Science*, 420, 833-838. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.05.219>
- Sinclair, T., Zieba, M., Irusta, S., Sebastián, V. y Arruebo, M. (2014). High-speed water sterilization using silver-containing cellulose membranes. *Nanotechnology*, 25(30). <https://doi.org/10.1088/0957-4484/25/30/305101>

- Sinha, N. K. (2012). Apples and pears: production, physicochemical and nutritional quality, and major products. *Handbook of Fruits and Fruit Processing: Second Edition*, 365-383. <https://doi.org/10.1002/9781118352533.CH22>
- Tang, C. Y., Yang, Z., Guo, H., Wen, J. J., Nghiem, L. D. y Cornelissen, E. (2018). Potable water reuse through advanced membrane technology. *Environmental Science and Technology*, 52(18), 10215-10223. <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.8B00562>
- Thomas, S. W. y Alcantar, N. A. (2017). System integration of functionalized natural materials. *MRS Bulletin*, 42(5), 343-349. <https://doi.org/10.1557/MRS.2017.90>
- Truffa-Giachet, F., Periolatto, M., Sanchez-Ramirez, D. O., Carletto, R. A., Varesano, A., Vineis, C. y Bongiovanni, R. (2018). Stability of ultraviolet-cured chitosan coating on cotton gauze for water filtration. En *Journal of Industrial Textiles*, 48(8), 1384-1396. <https://doi.org/10.1177/1528083718763777>
- Udayakumar, G. P., Kirthikaa, G. B., Muthusamy, S., Ramakrishnan, B. y Sivarajasekar, N. (2020). *Comparison and Evaluation of Electrospun Nanofiber Membrane for the Clarification of Grape Juice*. 77-92. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4638-9_7
- Ulbricht, M., Ansonge, W., Danielzik, I., König, M. y Schuster, O. (2009). Fouling in microfiltration of wine: The influence of the membrane polymer on adsorption of polyphenols and polysaccharides. *Separation and Purification Technology*, 68(3), 335-342. <https://doi.org/10.1016/J.SEPUR.2009.06.004>
- Urkiaga, A., De Las Fuentes, L., Acilu, M. y Uriarte, J. (2002). Membrane comparison for wine clarification by microfiltration. *Desalination*, 148(1-3), 115-120.
- Van Der Sluis, A. A., Dekker, M. y Van Boekel, M. A. J. S. (2005). Activity and concentration of polyphenolic antioxidants in apple juice. 3. Stability during storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(4), 1073-1080. <https://doi.org/10.1021/jfo40270r>
- Völker, C., Kramm, J., Wagner-Völker, M. C., Kramm, J. y Wagner, M. (2020). On the creation of risk: framing of microplastics risks in science and media. *Global Challenges*, 4(6), 1900010. <https://doi.org/10.1002/GCH2.201900010>
- Vu, A., Darvishmanesh, S., Marroquin, M., Husson, S. M. y Wickramasinghe, S. R. (2016). Fouling of microfiltration membranes by biopolymers. En *Separation Science and Technology*, 51(8), 1370-1379. <https://doi.org/10.1080/01496395.2016.1150295>
- Waley, A. S., Shaltout, O. E., Abu-El Yazeed, A. M., Al-Bakry, A. A. y Zeitoun, A. M. (2020). Bioactive compounds and physicochemical properties of fruit: orange juice mixes with Rosemary extract. *Alexandria Science Exchange Journal*, 41(2), 141-153. <https://doi.org/10.21608/asejaiqjsae.2020.87197>
- Wang, L. y Lin, S. (2019). Mechanism of selective ion removal in membrane capacitive deionization for water softening. *Environmental Science and Technology*, 53(10), 5797-5804. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b00655>
- Warsinger, D. M., Chakraborty, S., Tow, E. W., Plumlee, M. H., Bellona, C., Loutatidou, S., Karimi, L., Mikelonis, A. M., Achilli, A., Ghassemi, A., Padhye, L. P., Snyder, S. A., Curcio, S., Vecitis, C. D., Arafat, H. A. y Lienhard, J. H. (2018). A review of polymeric membranes and processes for potable water reuse. *Progress in Polymer Science*, 81, 209-237. <https://doi.org/10.1016/J.PROG.POLYMSCI.2018.01.004>
- Welle, F. y Franz, R. (2018). Microplastic in bottled natural mineral water: literature review and considerations on exposure and risk assessment. En *Food Additives & Contaminants: Part A*, 35(12), 2482-2492. <https://doi.org/10.1080/19440049.2018.1543957>
- Yang, Zhaochu, Egeland, E. B., Karlsen, F. y Jakobsen, H. (2009). Clogging failure in microfilter for blood cell separation and Its novel improvements tao dong. *Proceedings of the International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits, IPFA*, 759-763. <https://doi.org/10.1109/IPFA.2009.5232727>
- Yang, Zi, Zhou, Y., Feng, Z., Rui, X., Zhang, T. y Zhang, Z. (2019). A review on reverse osmosis and nanofiltration membranes for water purification. *Polymers* 2019, Vol. 11, Page 1252, 11(8), 1252. <https://doi.org/10.3390/POLYM11081252>
- Ye, Z. y Berson, R. E. (2014). Factors affecting cellulose hydrolysis based on inactivation of adsorbed enzymes. *Bioresource Technology*, 167, 582-586. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2014.06.070>
- Zhang, L., Luo, J., Menkhaus, T. J., Varadaraju, H., Sun, Y. y Fong, H. (2011). Antimicrobial nano-fibrous membranes developed from electrospun polyacrylonitrile nanofibers. *Journal of Membrane Science*, 369(1-2), 499-505. <https://doi.org/10.1016/J.JMEMSCI.2010.12.032>

UDLAP[®]

Departamento de Ingeniería Química,
Alimentos y Ambiental