

Moléculas de origen natural con actividad antimicrobiana acopladas a empaques activos para la preservación de alimentos

Molecules of natural origin with antimicrobial activity coupled with active packaging for food preservation

Pedro Jesús Barrón Uribe 

José Antonio Cervantes Chávez* 

Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México

*jose.antonio.cervantes@uaq.mx

DOI: 10.61820/dcuqa.2395-8847.1779

Fecha de recepción: 3 de diciembre del 2024

Fecha de aceptación: 3 de noviembre del 2025

Resumen

A través del tiempo se han creado diversas técnicas y tecnologías en la industria alimentaria para retrasar la descomposición de los alimentos; entre estas, los empaques buscan proteger el alimento y prolongar su vida útil a partir de los materiales que los componen. Si bien los empaques actuales cubren necesidades básicas de protección, hoy en día existe una gran pérdida económica y alimenticia debido a la rápida descomposición de los alimentos que contienen. Asimismo, ha habido un alza en la demanda por alimentos frescos con menos compuestos sintéticos y por la disminución de los residuos generados. Como respuesta a esta problemática se crearon los empaques activos, capaces de mantener el alimento inocuo por un largo periodo sin requerir la adición de conservadores sintéticos, ya que sus materiales retrasan el proceso de descomposición mediante compuestos de origen natural. Estas moléculas inhiben el desarrollo de microorganismos patógenos humanos transmitidos por alimentos, reduciendo la incidencia de enfermedades causadas por dichos agentes. La tasa de efectividad del empaque depende de su tipo, las moléculas utilizadas y las características del alimento. En ese sentido, la presente revisión explora el efecto antimicrobiano de distintas fuentes naturales implementadas en esta tecnología (antioxidantes, aceites esenciales, antimicrobianos provenientes de origen



animal, entre otros), así como su efectividad según el tipo de empaque y el material empleados.

Palabras clave: componentes antimicrobianos, empaques activos, natural, preservación de alimentos, seguridad alimenticia

Abstract

In order to prevent food spoilage, a great number of techniques and technologies have been developed over time in the food industry. Among these, packaging aims to protect food and extend its shelf life based on the containers' materials. Nonetheless, fulfilling basic protection needs is irrelevant given the significant economic and nutritional loss due to the rapid food spoilage caused by the current packaging. Additionally, there is a growing demand both for fresh food with fewer synthetic compounds, and less waste generation. Such concerns led to the creation of active packaging, which can keep food safe for a long period without the need for synthetic compounds. Its materials slow the spoilage process through naturally occurring compounds, which inhibit the growth of foodborne pathogens, thus reducing the incidence of illnesses caused by them. Its effectiveness rate is determined by the food characteristics, type of packaging, and molecules used. Therefore, this review explores the antimicrobial effect of various natural sources implemented in this technology (antioxidants, essential oils, and antimicrobial of animal origin) and their effectiveness according to the material and type of packaging.

Keywords: active packaging, antimicrobial compounds, food preservation, food safety, natural

Introducción

En la industria alimentaria, los empaques son elementos valiosos para la preservación de alimentos debido a que los protegen contra contaminantes físicos, químicos y biológicos. No obstante, si bien aseguran que el producto permanezca inocuo al servir como una barrera entre este, el entorno y el ambiente (Yildirim et al., 2017), es posible que el alimento se contamine durante el proceso de empaque o de forma previa, por ejemplo, en su cultivo o procesamiento (Malhotra et al., 2015).

Cuando un alimento se contamina con un agente biológico, el proceso de su descomposición suele acelerarse (Batiha et al., 2021). Este fenómeno natural no solo ocasiona que el alimento pierda sus características nutrimentales y organolépticas, sino que además se desarrollen microorganismos (MO) que pueden ser deterioradores y, de mayor alarma, aquellos patógenos para el humano. Se ha comprobado que es posible retrasar la descomposición de alimentos a través de técnicas como

la fermentación, la salazón, el congelamiento y la pasteurización, mas estos no aseguran que el alimento no se vuelva a contaminar o que conserve en su totalidad sus características nutrimentales y organolépticas y, principalmente, su inocuidad (Malhotra *et al.*, 2015). Por estas razones, se ha buscado que los empaques mantengan por completo la calidad y seguridad del producto, aun si este estuvo expuesto a algún contaminante antes o después del envasado.

Se ha descubierto, por otra parte, que una gran cantidad de alimento se pierde en fases previas a la venta (Fernández-León *et al.*, 2018) y se desperdicia en el hogar (Procuraduría Federal del Consumidor [PROFECO], 2022). De acuerdo con la PROFECO (2022), en México se desperdician alrededor de 38 toneladas de alimento por minuto (el equivalente a un tercio de la producción) debido a factores relacionados con su deterioro, la confusión en torno al etiquetado (fecha de caducidad y consumo preferente), entre otras situaciones. Aunado a esto, la seguridad alimentaria es una prioridad ante el aumento de casos de enfermedades transmitidas por alimentos (ETA) a causa de MO patógenos; en particular, durante 2022, en el país se registraron más de tres millones de casos de infecciones intestinales, con un número mayor de 23 mil por intoxicación alimentaria bacteriana (Instituto Nacional de las Personas Adultas Mayores [INAPAM], 2023).

En la actualidad, los polímeros sintéticos no biodegradables derivados del plástico son los más populares debido a su utilidad para fabricar distintos tipos de empaques (Deshmukh y Gaikwad, 2022); sin embargo, se ha buscado incrementar el empleo de empaques activos e inteligentes con el fin de reducir la pérdida, el desperdicio y el uso desmedido de materia. Los empaques activos aseguran la inocuidad del alimento al interaccionar con este y el entorno, mientras que los empaques inteligentes comunican al consumidor la calidad del producto (Caicedo-Perea *et al.*, 2022).

Los empaques activos transforman las condiciones del alimento y el entorno (por ejemplo, controlan la atmósfera interna o liberan sustancias) para prolongar la vida de anaquel y conservar la inocuidad del producto. Asimismo, buscan mejorar y extender sus cuatro funciones básicas (Fernández-León *et al.*, 2018):

- Contención: ofrecer un mejor manejo y transporte.
- Protección: evitar cualquier tipo de contaminación o alteración.

- Comunicación: informar en el envase sobre su contenido al consumidor.
- Comodidad: asegurar que el consumidor tenga el alimento a su conveniencia y disponibilidad.

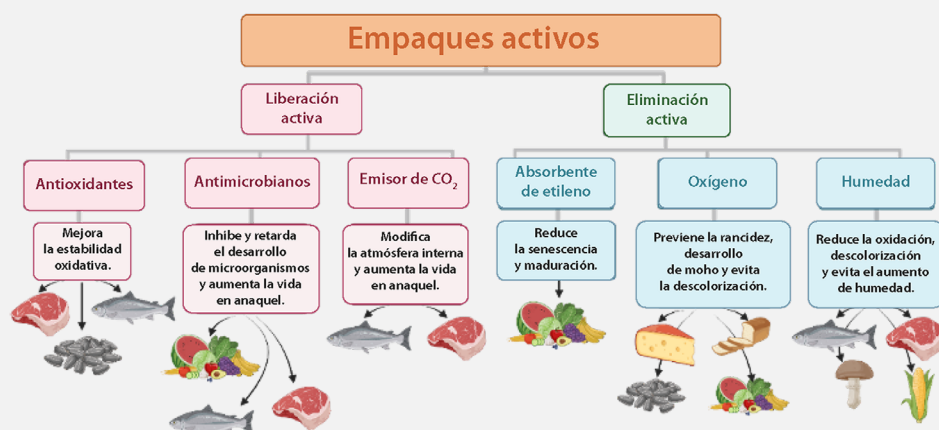
De acuerdo con Yildirim *et al.* (2017), los empaques activos se dividen en:

- Sistemas de eliminación activa: remueven compuestos no deseados ya sea del alimento o del entorno mismo, como oxígeno, etileno, humedad, olor, entre otros.
- Sistemas de liberación activa: adicionan compuestos al entorno o al alimento, como compuestos antimicrobianos, antioxidantes, dióxido de carbono, entre otros.

Dentro de las dos categorías anteriores, existe una amplia gama de sistemas (Figura 1). En este trabajo nos enfocaremos en el uso de compuestos antimicrobianos en sistemas de liberación por su capacidad de inhibir, reducir y retardar el desarrollo de MO patógenos presentes en alimentos a través de distintos mecanismos (Figura 2). Estos envoltorios pueden fabricarse a partir de polímeros biodegradables a base de polisacáridos, proteínas o lípidos (Deshmukh y Gaikwad, 2022). Los agentes activos se obtienen de diversos microorganismos, plantas y animales, y se adicionan por medio de tapetes, sobres o películas embebidos en un polímero comestible, entre otros métodos (Wyrwa y Barska, 2017).

Figura 1.

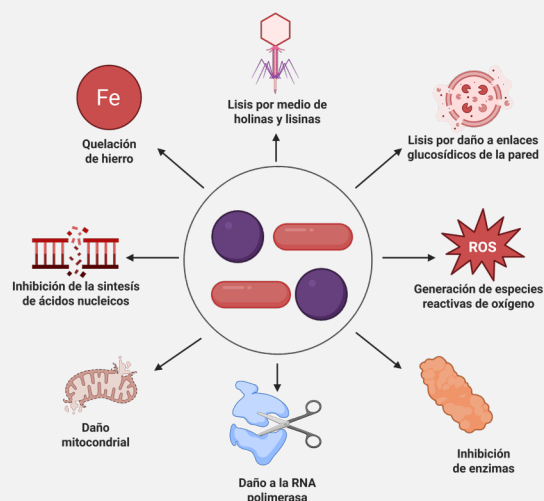
Clasificación de empaques activos



Fuente: elaboración propia con datos de Yildirim *et al.* (2017) y realizada con BioRender.com

Figura 2.

Mecanismos antimicrobianos provenientes
de compuestos naturales



Fuente: elaboración propia con datos de Deshmukh y Gaikwad (2022) y realizada con BioRender.com

Antimicrobianos procedentes de plantas

En tiempos recientes se ha buscado minimizar el uso de sustancias sintéticas antimicrobianas en los alimentos y sustituirlas por compuestos naturales (Pisoschi *et al.*, 2018), ya que se ha demostrado que las moléculas sintéticas pueden causar daños severos a la salud del consumidor y al medio ambiente (Mirza *et al.*, 2017). De acuerdo con Batiha *et al.* (2021), ciertos compuestos provenientes de fuentes naturales son capaces de inhibir el desarrollo de microorganismos patógenos, retrasar el periodo de descomposición e inclusive mejorar características de los alimentos.

Los fitoquímicos son compuestos químicos procedentes de las plantas que desempeñan diversas funciones dentro de estas, ya sea en forma de hormonas que ayudan a su desarrollo y reproducción o como defensa contra sus depredadores (Huang *et al.*, 2016). Esta clase de compuestos, con actividades antioxidantes, antidepresivas, neuroprotectoras y antimicrobianas, se producen tras la metabolización de polisacáridos, ácidos y azúcares (Siddiqui *et al.*, 2023). Sus características no solo aumentan el tiempo de vida en anaquel del producto en cuestión, sino que también ofrecen beneficios para el consumidor.

Aceites esenciales

Los aceites esenciales (AE) son metabolitos secundarios sintetizados por plantas aromáticas. Suelen utilizarse en industrias como la farmacéutica, cosmética y alimenticia, debido a su

capacidad antimicrobiana y antifúngica (Deshmukh y Gaikwad, 2022) por la presencia de compuestos como fenoles, ésteres, terpenoides, terpenos, aldehídos y lactonas (Carpena *et al.*, 2021). Su eficacia depende del área de recolección, la forma de extracción y las propiedades químicas del órgano de la planta de la que se extraen, así como de las propiedades fisicoquímicas del material al que se aplican (Deshmukh y Gaikwad, 2022; Yildirim *et al.*, 2017). Los AE pueden adicionarse a los empaques activos o directamente al alimento a través de capas o películas comestibles (Carpena *et al.*, 2021), y una de las ventajas que ofrecen sobre otros compuestos es que son más aceptados entre los consumidores por el alza en la preferencia por los productos orgánicos, ya que se perciben como más seguros (Irkin y Esmer, 2015).

Irkin y Esmer (2015) mencionan que los AE del ajo, cebolla, canela, laurel, orégano, menta, comino, entre otros, han demostrado poseer actividad antimicrobiana. Asimismo, una gran cantidad de estudios han puesto a prueba la efectividad de esta clase de compuestos frente a diversos microorganismos para prolongar la vida de anaquel de los alimentos. De acuerdo con Carpena *et al.* (2021), se ha logrado obtener un efecto antimicrobiano contra especies bacterianas patógenas como *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, *Campylobacter jejuni*, *Salmonella enterica* y *Escherichia coli*.

Por otra parte, diversos estudios avalan la efectividad de los AE contra hongos, ya sea por su capacidad de inhibir la síntesis de la pared celular o de afectar las mitocondrias y generar especies reactivas de oxígeno (Nazzaro *et al.*, 2017). Por ejemplo, el AE obtenido del epicarpio del naranjo dulce causa la pérdida del citoplasma en las hifas e inhibe el desarrollo de *Aspergillus niger* (Nazzaro *et al.*, 2017). También se ha comprobado que el eneldo, comino, hinojo y anís producen daños significativos en *Candida* spp. al tener efecto sobre las mitocondrias (Vieira *et al.*, 2019).

A pesar de que poseen una alta eficacia, en ocasiones ciertos AE presentan un fuerte olor y sabor debido a su procedencia, pudiendo alterar las características organolépticas del alimento (Bedoya-Serna *et al.*, 2018); un claro ejemplo es el ajo, cuyo peculiar aroma resulta atractivo o repulsivo según el consumidor. Para evitar que este factor se convierta en un problema, se utilizan esencias industriales extremadamente útiles para enmascarar el olor sin interferir con la actividad antimicrobiana (Heras-Mozos *et al.*, 2019).

Polifenoles

Los polifenoles son compuestos naturales que se encuentran de forma abundante en flores, semillas, tallos, té, vegetales y frutas, por mencionar algunas fuentes (Deshmukh y Gaikwad, 2022). A este grupo pertenecen los flavonoides y no flavonoides, compuestos químicos con una estructura similar a la de los fenoles y cuya diferencia radica en su esqueleto y anillos aromáticos (Deshmukh y Gaikwad, 2022; Siddiqui *et al.*, 2023). En los últimos años ha habido un interés especial en estos agentes debido a que no solo son antioxidantes, sino que también funcionan como antimicrobianos al debilitar la estabilidad de la pared celular, alterar la membrana celular e interrumpir la unión de ciertas enzimas. Lamentablemente, aún no se comprenden a fondo estos procesos y, por ende, su efectividad contra los MO es relativamente desconocida (Siddiqui *et al.*, 2023; Tsuchiya, 2015).

Taninos

Los taninos son polifenoles solubles en agua procedentes de madera, tallos, hojas y semillas. Forman parte importante de la dieta de los animales y, pese a que su composición dificulta que los humanos los digieran, algunos alimentos de su dieta cuentan con ellos, como el vino y el té verde (Siddiqui *et al.*, 2023). Además de ser antioxidantes, los taninos presentan mecanismos antimicrobianos como la inhibición enzimática, la descomposición de la membrana celular a través del contacto con esta y ciertas proteínas, y la quelación de hierro. La efectividad de estos compuestos ha sido estudiada en *S. aureus*, *Vibrio* spp., *Salmonella typhimurium* y *E. coli* (Siddiqui *et al.*, 2023).

Antioxidantes

Los antioxidantes naturales (como los polifenoles o taninos) alargan la vida de anaquel de los alimentos al evitar que se oxiden; el proceso de oxidación ocurre cuando los ácidos grasos no saturados entran en contacto con algún catalizador (luz, hierro, calor, cobre, enzimas), lo que altera las propiedades del alimento (Deshmukh y Gaikwad, 2022; Lü *et al.*, 2010). Dichos cambios se atribuyen a los radicales libres, que surgen como consecuencia natural de la presencia de oxígeno, azufre y nitrógeno en un sistema biológico. Estas moléculas, clasificadas como especies reactivas de oxígeno, especies reactivas de azufre o especies reactivas de nitrógeno (ROS, RSS y RNS, por sus siglas en inglés), propician la degradación de proteínas y ácidos nucleicos, así como la formación de cetonas, aldehídos, hidroperóxidos y otros componentes. De tal forma, los antioxidantes previenen los efectos organolépticos de los radicales libres en el alimento.

Antimicrobianos de origen natural

Ciertas proteínas y enzimas de origen animal poseen actividad antimicrobiana pues son producidas como un mecanismo de defensa frente a depredadores (Batiha *et al.*, 2021). La lactoferrina y la lisozima son ejemplos de estas sustancias, las cuales destruyen la membrana celular de bacterias Gram positivas (G+) y Gram negativas (G-) (Pisoschi *et al.*, 2018).

Lactoferrina

La lactoferrina (LF) es una glicoproteína globular de una sola cadena polipeptídica compuesta entre 691 y 696 aminoácidos, con una masa molecular de 78 kDa (Niaz *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2019). Está presente en distintos fluidos biológicos, como el líquido seminal y la saliva, así como en superficies mucosas y dentro de algunos leucocitos polimorfonucleares, pero se encuentra en mayor concentración en leche de vaca y leche materna (Wang *et al.*, 2019). La carga de la superficie de la LF es positiva (Wang *et al.*, 2019), lo que le otorga una capacidad antimicrobiana, ya que al unir iones de hierro causa deficiencia de este (Jenssen y Hancock, 2009). Posee actividad contra bacterias, virus, hongos (Gyawali y Ibrahim, 2014; Niaz *et al.*, 2019) y MO como *L. monocytogenes*, *E. coli*, *Klebsiella* y *Corynebacterium* (Gyawali y Ibrahim, 2014).

Lactoperoxidasa

Al igual que la lactoferrina, la lactoperoxidasa (LPS) es una enzima presente en la leche de vaca secretada por las células epiteliales de las glándulas mamarias (Deshmukh y Gaikwad, 2022). Si bien se encuentra también en la leche humana, su producción en esta es 20 veces menor en comparación con la cantidad encontrada en la de bovino (Batiha *et al.*, 2021). Esta glicoproteína, con una masa molecular de 78 kDa, posee capacidad bacteriostática y bactericida contra bacterias G+ y G- (Al-Baarri *et al.*, 2019). La actividad de la LPS se basa en un sistema de tres componentes: la enzima LPS, el tiocianato y el peróxido de hidrógeno (Al-Baarri *et al.*, 2019). Una vez que la LPS cataliza el ion tiocianato (SCN^-), se genera ácido hipotiocianoso (HOSCN) e hipotiocianato (OSCN^-), y el OSCN^- oxida y altera los grupos sulfhidrilos (-SH) de las proteínas en la membrana citoplasmática bacteriana, con un efecto bactericida (Deshmukh y Gaikwad, 2022; Al-Baarri *et al.*, 2019). Debido a esta capacidad, la LPS se ha empleado en diversos escenarios, por ejemplo, para evitar la descomposición o preservar productos cárnicos (Batiha *et al.*, 2021), y se ha descubierto que su efecto puede incrementar si se utilizan en conjunto compuestos como el quitosano, la lisozima y los β -carotenos (Al-Baarri *et al.*, 2019).

Lisozima

La lisozima, N-acetil-murámico hidrolasa o muramidasa es una proteína monomérica presente en leche de mamíferos y huevos de aves; inclusive, se conoce que existe una gran cantidad de lisozimas en órganos y secreciones humanas, así como en plantas, bacterias y organismos vertebrados e invertebrados (Wu et al., 2019). De acuerdo con la Food and Drug Administration (FDA, 1998), se le considera “generalmente reconocida como segura” (GRAS, por sus siglas en inglés: *Generally Recognized as Safe*). Estas proteínas han sido estudiadas debido a su capacidad para mantenerse estables en un rango extenso de temperaturas (4-95 °C) y de pH (2-10) (Batiha et al., 2021; Wu et al., 2019). Su actividad antimicrobiana se basa en dañar la pared celular al atacar su capa de peptidoglicano. Una vez hidrolizados los enlaces glucosídicos β (1 \rightarrow 4) existentes entre el ácido N-acetil-murámico y la N-acetil-D-glucosamina, se provoca la lisis bacteriana (Aloui y Khwaldia, 2016; Yildirim et al., 2017). Se ha demostrado que bacterias G⁺ como *Bacillus stea-rothermophilus*, *L. monocytogenes*, *Clostridium tyrobutyricum* y *Micrococcus* spp. (Batiha et al., 2021) pueden ser inhibidas por la lisozima, ya que su pared celular está compuesta en mayor cantidad por peptidoglicano, a diferencia de las G⁻, que poseen menos (Deshmukh y Gaikwad, 2022), aunado a que la capa de lipopolisacárido limita el acceso al sitio de acción (Aloui y Khwaldia, 2016).

Antimicrobianos provenientes de microorganismos

Existen distintos MO que inhiben de forma natural el desarrollo de otros MO a través de componentes sintetizados por ellos mismos, y que son considerados GRAS (Batiha et al., 2021). Entre estos, las bacterias ácido lácticas (BAL) son conocidas por producir compuestos antimicrobianos que inhiben el crecimiento y desarrollo de otras bacterias (Ramos et al., 2020). Artículos presentados por Sadiq et al. (2019), Ramos et al. (2020), entre otros, han destacado el uso de este tipo de componentes, ya que pueden aprovecharse más allá de los empaques activos, por ejemplo, en alimentos perecederos como frutas y verduras, pues ofrecen protección y prevención contra el desarrollo de diversos MO (Batiha et al., 2021).

Bacteriocinas

Las bacteriocinas son péptidos antimicrobianos (PAM) producidos mayormente por BAL, secretadas y que inhiben el desarrollo de bacterias (Irkin y Esmer, 2015). Su popularidad para la conservación de alimentos deriva de que no representan riesgo alguno contra la salud humana, pues son degradados por las enzimas proteolíticas que se encuentran en el tracto gastrointestinal hu-

mano, además de ser hipoalergénicas y termoestables (Irkin y Esmer, 2015). Los PAM suelen tener una carga neta catiónica y características anfipáticas (Cañaveral Sanchez *et al.*, 2020). La actividad de las bacteriocinas es versátil, ya que inhiben la síntesis de la pared celular al formar complejos con el lípido II y formar poros en la membrana, incrementar la producción de superóxido e inhibir la RNA polimerasa, así como despolarizar y permeabilizar la membrana; también pueden despolarizar la membrana mitocondrial y producir especies reactivas de oxígeno en parásitos (Huang *et al.*, 2021). Se ha observado que estos PAM actúan sobre MO como *L. monocytogenes*, *Bacillus cereus*, *S. aureus* y *Alicyclobacillus acidoterrestris* (Gu-mienna y Górna, 2021). Es posible categorizarlos a partir de diversas características, pero Aljohani *et al.* (2023) propusieron una clasificación de tres clases basadas en la masa molecular, dependiendo de si están modificadas postraduccionalmente, si poseen puentes disulfuro y si son termolábiles.

Nisina

Producida por *Lactococcus lactis*, la nisina es una bacteriocina presente en la leche, con una masa molecular de 3.4 kDa (Azhar *et al.*, 2017). Se trata de una proteína termoestable que ha demostrado poseer mayor actividad antimicrobiana contra bacterias G⁺ que G⁻, como *L. monocytogenes*, *Enterococcus*, *Micrococcus*, *Staphylococcus*, *Pediococcus*, entre otras (Batiha *et al.*, 2021). Su efecto antimicrobiano se produce cuando se une a paredes celulares específicas, lo que destruye la membrana citoplasmática y forma un poro por el cual es expulsado el contenido intracelular. Debido a su actividad, este péptido se utiliza en productos como comida enlatada, carne curada y pepinillos (Chan *et al.*, 2023).

Pediocina

Producida por *Pediococcus* spp., la pediocina es una bacteriocina termoestable (Niamah, 2018) con una masa molecular de 4.6 kDa y una carga neta positiva (Rodríguez *et al.*, 2002). Debido a su capacidad bactericida y bacteriostática contra bacterias G⁺, es uno de los péptidos antimicrobianos con mayores usos comerciales (Khorshidian *et al.*, 2021; Pilevar *et al.*, 2018). Su actividad bactericida es versátil, ya que forma agujeros en la membrana de la célula objetivo, inhibe la síntesis de ácidos nucleicos, cambia el potencial electrostático e inhibe diversas enzimas de la célula (Khorshidian *et al.*, 2021). Se ha observado que tiene efecto sobre *L. monocytogenes*, *Clostridium perfringens*, *B. cereus*, *Aeromonas hydrophila*, *Enterococcus faecalis* y *S. aureus* (Niamah, 2018). Ante los resultados de di-

versos estudios que han demostrado que *L. monocytogenes* posee una gran habilidad para adaptarse a temperaturas frías y a valores de pH mayores a 5, siendo el contaminante principal de los productos cárnicos a nivel global, la inclusión de pediocina en los empaques comerciales ha aumentado, ya que logra conservar su actividad a temperaturas de -80°C y en un rango de pH de 2-10 (Khorshidian *et al.*, 2021; Niamah, 2018).

Reuterina

La reuterina es un antimicrobiano producido por algunas cepas de *Lactobacillus reuteri* que induce estrés oxidativo en las células objetivo (Bennett *et al.*, 2021). Características como la termoestabilidad, la resistencia a un amplio rango de pH, así como a enzimas lipolíticas y proteolíticas, además de una alta solubilidad en agua, convierten la reuterina en una molécula ideal para garantizar la calidad y seguridad de algunos alimentos (Gyawali y Ibrahim, 2014). Si bien actualmente no se conoce con certeza la forma en que actúa sobre las células objetivo, existen distintas explicaciones, como que el aldehído presente en la bacteriocina reacciona con el grupo $-\text{SH}$ contenido en las moléculas esenciales de la célula objetivo, o que inhibe la síntesis de DNA y eso lleva a la muerte celular (Deshmukh y Gaikwad, 2022). Sin embargo, está bien documentada su efectividad contra *C. jejuni*, *E. coli*, *E. coli* O157:H7, *Yersinia enterocolitica*, *S. aureus* y *Salmonella choleraesuis* (Asare *et al.*, 2020; Batiha *et al.*, 2021).

Quitosano

El quitosano es un biopolímero policatiónico no tóxico y biodegradable (Deshmukh y Gaikwad, 2022) procedente de los exoesqueletos de artrópodos (Gyawali y Ibrahim, 2014), aunque también puede obtenerse de hongos (Batiha *et al.*, 2021). Se trata de un polisacárido lineal compuesto por monómeros de N-acetil-D-glucosamina unidos por enlaces β (1 \rightarrow 4) (Deshmukh y Gaikwad, 2022; Perinelli *et al.*, 2018). Su peso molecular determina la capacidad de su bioactividad, de modo que esta será más fuerte con un peso bajo (<20 kDa) que con uno alto (>120 kDa) (Kou *et al.*, 2021). La eficacia de este agente microbiano se atribuye al grupo amino que posee, el cual interactúa con la membrana celular del patógeno (con carga negativa) y provoca la lixiviación de elementos intracelulares y proteínas (Deshmukh y Gaikwad, 2022); no obstante, su aplicación como antimicrobiano en empaques activos puede verse limitada por su insolubilidad a pH básicos y neutros (Gyawali y Ibrahim, 2014). Se ha demostrado que el quitosano evita el desarrollo de bacterias y hongos, siendo más efectivo contra bacterias G⁺ como

S. aureus y *Staphylococcus saprophyticus*; sin embargo, se ha reportado que, al combinarse con AE, su espectro de inhibición aumenta contra bacterias G- como *Klebsiella pneumoniae*, *E. coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas fluorescens*, *Shewanella putrefaciens*, *Shewanella baltica* y *Serratia* spp. (Flórez et al., 2022).

Bacteriófagos

Los bacteriófagos (fagos) son virus que infectan bacterias, la mayoría de los cuales pertenecen a la orden de los *Caudovirales* (Wagh et al., 2023). Al igual que las moléculas mencionadas, poseen una fuerte actividad antimicrobiana y representan una opción innovadora para la industria alimentaria por considerarse como GRAS, así como por ser efectivos contra bacterias G+ y G- asociadas a la descomposición de alimentos y las ETA (Narayanan et al., 2024). Los fagos se clasifican de acuerdo con su ciclo de vida, pudiendo ser virulentos o temperados (Wagh et al., 2023). El ciclo de vida de los virulentos es lítico y consiste en unirse a la superficie de la bacteria a infectar, inyectar su genoma y usar la maquinaria celular del anfitrión para crear nuevas partículas fágicas, tras lo cual, con la ayuda de proteínas, lisan la bacteria huésped y liberan la progenie (Grande, 2020). Existen dos proteínas ampliamente utilizadas por los fagos para destruir la pared celular: lisinas y holinas; las primeras destruyen la pared celular bacteriana, mientras que las segundas perforan el citoplasma bacteriano (Wagh et al., 2023). Por otra parte, estos MO requieren de una cantidad alta de viriones para ser efectivos (Wagh et al., 2023). Son estables a pH de 5-8 y, en bajas temperaturas, a pH de 4-10; sin embargo, son sensibles a la luz visible y la ultravioleta, que causan daños en el genoma (Grande, 2020). Los fagos han demostrado ser eficaces contra *L. monocytogenes*, *E. coli*, *Salmonella* spp., *Vibrio* spp., *Shigella* spp., *Bacillus* spp. y *Campylobacter* (Grande, 2020; Narayanan et al., 2024).

Nanotecnología

Un campo con un amplio rango de innovación en cuanto al diseño de materiales con actividad antimicrobiana es la nanotecnología, pues dentro de sus características se encuentra la capacidad de controlar y modificar materia y sistemas a escala nanométrica (Ojeda et al., 2019). De acuerdo con la Organización Internacional de Estandarización (ISO, 2015), las dimensiones que definen los rangos de nanoescala son de 1 a 100 nanómetros (nm), donde 1 nm equivale a 1×10^{-9} metros. Gracias a sus particularidades, es posible aplicar la nanotecnología de distintas formas, incluyendo en los empaques activos, ya que no

solo evita o retrasa el deterioro de alimento, sino que también puede mejorar las propiedades mecánicas, térmicas o de la tecnología de barreras con la que estos cuenten (Mahmud *et al.*, 2022).

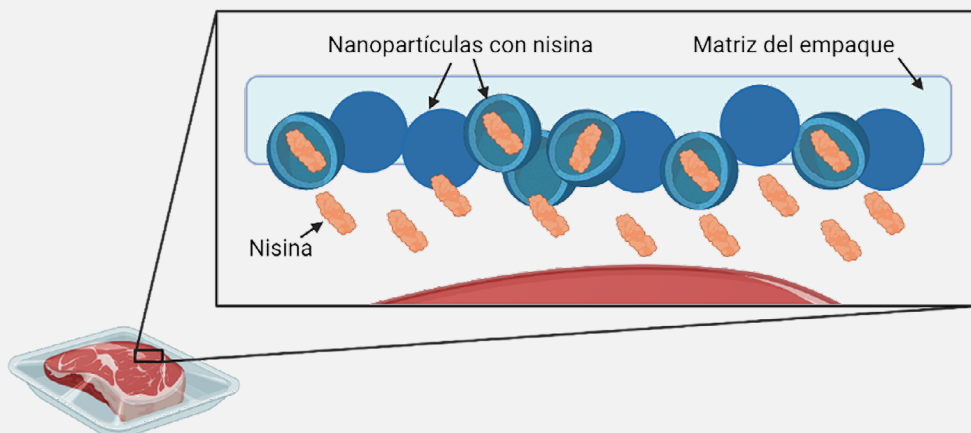
Nanopartículas y nanovesículas

Al utilizar nanotecnología y compuestos antimicrobianos naturales como agentes activos surgen problemas a raíz de factores como la matriz en la que serán empleados o la tecnología misma (Quinto *et al.*, 2019); no obstante, a pesar de las limitantes, se han obtenido resultados prometedores con su uso. Por ejemplo, se ha observado que las nanopartículas de pediocina y óxido de zinc inhiben el desarrollo de *S. aureus* y *L. monocytogenes* (Gumienna y Górna, 2021). Chatzidaki *et al.* (2019) reportaron actividad inhibitoria contra el desarrollo de *S. aureus*, *B. cereus*, *L. monocytogenes* y *L. lactis* mediante nanopartículas de nisina con AE de dictamo debido a su alto porcentaje de carvacrol y timol. Gomaa (2018) informó que las nanopartículas de plata sirven como adyuvante para las bacteriocinas y aumentan el efecto bactericida contra bacterias patógenas de humanos como *E. coli* y *P. aeruginosa*. Finalmente, Bahrami *et al.* (2019) encontraron que la nanoencapsulación de nisina en liposomas prolonga su liberación y aumenta la vida útil de los alimentos en anaquel; esta técnica no incrementa la actividad antimicrobiana de la nisina, sino que la prolonga, pues evita que se vea reducida al entrar en contacto directo con el alimento (Figura 3).

El uso de nanotecnología en empaques activos trae consigo oportunidades para evitar el deterioro alimenticio; sin embargo, se requieren más estudios que avalen la seguridad del consumidor frente a la comercialización de alimentos que hayan entrado en contacto con esta tecnología (Quinto *et al.*, 2019). Si bien se conoce que las nanopartículas orgánicas, como el quitosano, los lípidos y las proteínas, no originan efectos tóxicos en el consumidor, las nanopartículas de plata, nanoarcilla, entre otras, pueden ser citotóxicas luego de una exposición continua a largo plazo en grandes cantidades, sobre todo si no se encuentran unidas a una matriz polimérica adecuada capaz de retener las partículas para evitar que migre al alimento (Ashfaq *et al.*, 2022).

Figura 3.

Nanoencapsulación de nisina en liposomas



Fuente: elaboración propia con datos de Bahrami *et al.* (2019)
y realizada con BioRender.com

Aplicaciones

Los agentes antimicrobianos en los empaques activos no se limitan a prolongar la vida útil de los alimentos al inhibir el desarrollo de bacterias, hongos y levaduras, sino que también ayudan a reducir la contaminación entre los alimentos frescos y los procesados, así como a proteger los equipos donde se procesan los alimentos (por ejemplo, máquinas de envasado, guantes y cintas transportadoras) (Deshmukh y Gaikwad, 2022).

La elección del agente antimicrobiano dependerá de la composición, método de obtención, mecanismo de acción, forma de almacenamiento del producto, además de la tasa de desarrollo y condiciones fisiológicas de los MO relacionados con el alimento y el agente. Asimismo, debe considerarse que existen dos formas de adicionar los agentes: aplicándolos de forma directa al producto o incluyéndolos en los materiales con los que se fabrica el empaque (Deshmukh y Gaikwad, 2022; Siddiqui *et al.*, 2023). Si el agente se adiciona de forma directa, es posible que su actividad no sea del todo efectiva debido a su interacción con los componentes del producto. Por otro lado, adicionarlo de forma indirecta resuelve esa problemática, mas su eficacia ahora depende de que el empaque lo libere de forma constante y controlada, así como de su concentración; debe considerarse que una alta concentración puede alterar las características organolépticas y ocasionar que se degrade antes de tiempo (Siddiqui *et al.*, 2023).

El empaque y agente a utilizar dependerán del alimento. Por ejemplo, las frutas y verduras se descomponen y pierden sus características alimenticias rápidamente debido a que en

alguna parte del proceso (cultivo, transporte, empaque o procesamiento) pueden sufrir un daño que permita el desarrollo de MO como *E. coli* o *Erwinia*, o que durante el resguardo el método de conservación sea inadecuado y propicie el desarrollo de hongos o levaduras (Erdog̃rul y Şener, 2005; Pérez-Gago y Palou, 2016). Para este caso, se debe elegir una matriz que no entre en contacto directo con el alimento, junto con un agente que pueda ser liberado de forma constante y controlada, como algún compuesto fenólico, el cual no solo evitará el desarrollo de MO, sino que también retrasará el proceso de oxidación, aumentando así la vida en anaquel (Deshmukh y Gaikwad, 2022).

En cuanto a las proteínas de origen animal (carne/pescado), se trata de alimentos que se colonizan y descomponen de forma acelerada por la humedad alta y las grasas que poseen, lo cual da pie a la degradación de proteínas y la oxidación de lípidos, procesos que alteran la calidad del producto. En este caso, la opción sería utilizar una matriz que retenga el compuesto activo y lo libere de forma controlada, junto con una nisina nanoencapsulada en lugar de un compuesto fenólico (Bahrami *et al.*, 2019; Deshmukh y Gaikwad, 2022).

Conclusión

La implementación de componentes antimicrobianos en empaques activos para la preservación de alimentos ofrece diversas ventajas sobre los componentes sintéticos empleados para alargar la vida de anaquel de los alimentos. Entre ellas se encuentra que su origen natural responde a la demanda del consumidor por productos con menos compuestos sintéticos, que el espectro antimicrobiano de los agentes es amplio y que es posible agregar características deseables al alimento a través de estos, como los antioxidantes extraídos de las plantas.

Los agentes revisados destacan por sus distintos mecanismos de acción, como el daño a las mitocondrias o a la pared celular, la interrupción del ciclo celular, la inactivación de enzimas y metabolitos vitales para las funciones celulares, entre otros. Asimismo, resaltan por su capacidad de extender la vida de anaquel de los alimentos sin alterar su composición nutrimental y organoléptica y, en caso de hacerlo, se puede utilizar algún aditivo natural o sintético para mitigar el problema, como ocurre con el AE de ajo, cuyo olor se enmascara, o bien, se dirige el producto a un mercado en específico para evitar que se continúe manipulando. También debe remarcarse que su adición no representa peligro alguno para el consumidor, además de que ofrecen que los productos no se descompongan en un corto tiempo y, en particular, que sean más accesibles.

A pesar de las bondades de los empaques activos, se requiere estudiar a fondo los agentes antimicrobianos para explotar de forma correcta todas sus propiedades, así como las matrices donde se implementen y las concentraciones que garanticen una mayor efectividad sin necesidad de aumentarlas de tal manera que degraden rápido el producto o cambien sus características. Finalmente, es prioritario realizar una valoración que dictamine si este tipo de empaques disminuye los niveles de desperdicio de alimentos y ETA, además del impacto de consumo en la población en general.

Referencias

- Al-Baarri, A.N., Damayanti, N.T., Legowo, A.M., Tekiner, İ.H. y Hayakawa, S. (2019). Enhanced antibacterial activity of lactoperoxidase-thiocyanate-hydrogen peroxide system in reduced-lactose milk whey. *International Journal of Food Science*, 2019(1). <https://doi.org/10.1155/2019/8013402>
- Aljohani, A.B., Al-Hejin, A.M. y Shori, A.B. (2023). Bacteriocins as promising antimicrobial peptides, definition, classification, and their potential applications in cheeses. *Food Science and Technology (Campinas)*, 43(5). <https://doi.org/10.1590/fst.118021>
- Aloui, H. y Khwaldia, K. (2016). Natural antimicrobial edible coatings for microbial safety and food quality enhancement. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(6), 1080-1103. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12226>
- Asare, P.T., Zurfluh, K., Greppi, A., Lynch, D., Schwab, C., Stephan, R. y Lacroix, C. (2020). Reuterin demonstrates potent antimicrobial activity against a broad panel of human and poultry meat *Campylobacter* spp. Isolates. *Microorganisms*, 8(1), 78. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8010078>
- Ashfaq, A., Khursheed, N., Fatima, S., Anjum, Z. y Younis, K. (2022). Application of nanotechnology in food packaging: pros and cons. *Journal of Agriculture and Food Research*, 7, 100270. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100270>
- Azhar, N.S., Zin, N.H.M. y Hamid, T.H.T.A. (2017). *Lactococcus Lactis* strain A5 producing nisin-like bacteriocin active against gram positive and negative bacteria. *Tropical Life Sciences Research*, 28(2), 107-118. <https://doi.org/10.21315/tlsr2017.28.2.8>
- Bahrami, A., Delshadi, R., Jafari, S.M. y Williams, L. (2019). Nanoencapsulated nisin: an engineered natural antimicrobial system for the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 94, 20-31. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.10.002>
- Batiha, G.E., Hussein, D.E., Algammal, A.M., George, T.T., Jeandet, P., Al-Snafi, A.E., Tiwari, A., Pamplona Pagnossa, J., Lima, C.M., Thorat,

- N.D., Zahoor, M., El-Esawi, M., Dey, A., Alghamdi, S., Hetta, H.F. y Cruz-Martins, N. (2021). Application of natural antimicrobials in food preservation: recent views. *Food Control*, 126, 108066. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108066>
- Bedoya-Serna, C.M., Dacanai, G.C., Fernandes, A.M. y Pinho, S.C. (2018). Antifungal activity of nanoemulsions encapsulating oregano (*Origanum vulgare*) essential oil: *in vitro* study and application in Minas Padrão cheese. *Brazilian Journal of Microbiology*, 49(4), 929–935. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2018.05.004>
- Bennett, S., Said, L.B., Lacasse, P., Malouin, F. y Fliss, I. (2021). Susceptibility to nisin, bactofencin, pediocin and reuterin of multidrug resistant *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus dysgalactiae* and *Streptococcus uberis* causing bovine mastitis. *Antibiotics*, 10(11), 1418. <https://doi.org/10.3390/antibiotics10111418>
- Caicedo-Perea, C., Solís-Molina, M. y Jiménez-Rosero, H. (2022). Empaques inteligentes: definiciones, tipologías y aplicaciones. *Informador Técnico*, 86(2), 220–253. <https://doi.org/10.23850/22565035.3985>
- Cañaveral Sanchez, I., Chalarca Vélez, J.R. y Gaviria Arias, D. (2020). Bacteriocinas: visión básica y aplicada. *Alimentos, Ciencia e Ingeniería*, 27(2), 7–33. <https://revistas.uta.edu.ec/index.php/aci/article/view/938>
- Carpena, M., Nuñez-Estevez, B., Soria-Lopez, A., Garcia-Oliveira, P. y Prieto, M.A. (2021). Essential oils and their application on active packaging systems: a review. *Resources*, 10(1), 7. <https://doi.org/10.3390/resources10010007>
- Chan, K.T., Song, X., Shen, L., Liu, N., Zhou, X., Cheng, L. y Chen, J. (2023). Nisin and its application in oral diseases. *Journal of Functional Foods*, 105, 105559. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2023.105559>
- Chatzidaki, M.D., Balkiza, F., Gad, E., Alexandraki, V., Avramiotis, S., Georgalaki, M., Papadimitriou, V., Tsakalidou, E., Papadimitriou, K. y Xenakis, A. (2019). Reverse micelles as nano-carriers of nisin against foodborne pathogens. Part II: the case of essential oils. *Food Chemistry*, 278, 415–423. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.078>
- Deshmukh, R.K. y Gaikwad, K.K. (2022). Natural antimicrobial and antioxidant compounds for active food packaging applications. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14, 4419–4440. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02623-w>
- Erdog̃rul, Ö. y Şener, H. (2005). The contamination of various fruit and vegetable with *Enterobius vermicularis*, *Ascaris* eggs, *Entamoeba histolyca* cysts and *Giardia* cysts. *Food Control*, 16(6), 557–560. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2004.06.016>
- Food and Drug Administration. (1998). Direct food substances affirmed as generally recognized as safe; egg white lysozyme. *Fed-*

- eral Register, 63(49), 12421-12426. <https://www.federalregister.gov/documents/1998/03/13/98-6571/direct-food-substances-affirmed-as-generally-recognized-as-safe-egg-white-lysozyme>
- Fernández-León, D.E., Hernández-Urbe, J.P., Campos-Montiel, R.G. y Jiménez-Alvarado, R. (2018). Empaques activos en la industria de los alimentos. *Boletín de Ciencias Agropecuarias del ICAP*, 4(8). <https://doi.org/10.29057/icap.v4i8.3341>
- Flórez, M., Guerra-Rodríguez, E., Cazón, P. y Vázquez, M. (2022). Chitosan for food packaging: recent advances in active and intelligent films. *Food Hydrocolloids*, 124, 107328. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107328>
- Gomaa, E.Z. (2018). Synergistic antibacterial efficiency of bacteriocin and silver nanoparticles produced by probiotic *Lactobacillus paracasei* against multidrug resistant bacteria. *International Journal of Peptide Research and Therapeutics*, 25, 1113-1125. <https://doi.org/10.1007/s10989-018-9759-9>
- Grande, J. (2020). *Lab. Bioquímica/Bacteriófagos como agentes de Biocontrol en los alimentos. (TIP)*.
- Gumienna, M. y Górna, B. (2021). Antimicrobial food packaging with biodegradable polymers and bacteriocins. *Molecules*, 26(12), 3735. <https://doi.org/10.3390/molecules26123735>
- Gyawali, R. y Ibrahim, S.A. (2014). Natural products as antimicrobial agents. *Food Control*, 46, 412-429. <https://doi.org/10.1016/j.food-cont.2014.05.047>
- Heras-Mozos, R., Muriel-Galet, V., López-Carballo, G., Catalá, R., Hernández-Muñoz, P. y Gavara, R. (2019). Development and optimization of antifungal packaging for sliced pan loaf based on garlic as active agent and bread aroma as aroma corrector. *International Journal of Food Microbiology*, 290, 42-48. <https://doi.org/10.1016/j.ijfood-micro.2018.09.024>
- Huang, F., Teng, K., Liu, Y., Cao, Y., Wang, T., Ma, C., Zhang, J. y Zhong, J. (2021). Bacteriocins: potential for human health. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2021(1), 5518825. <https://doi.org/10.1155/2021/5518825>
- Huang, Y., Xiao, D., Burton-Freeman, B.M. y Edirisinghe, I. (2016). Chemical changes of bioactive phytochemicals during thermal processing. En *Reference Module in Food Science*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100596-5.03055-9>
- Instituto Nacional de las Personas Adultas Mayores. (31 de julio del 2023). *Las Enfermedades Transmitidas por Alimentos (ETA) tienen mayor riesgo de contraerlas las personas adultas mayores*. Gobierno de México. Recuperado el 2 de abril del 2024 en <https://www.gob.mx/inapam/es/articulos/las-enfermedades-transmitidas-por-alimentos-eta-tienen-mayor-riesgo-de-contraer>

las-las-personas-adultas-mayores#:~:text=De%20acuerdo%20con%20el%20Sistema,casos%20por%20intoxicaci%C3%B3n%20alimentaria%20bacteriana

- Irkin, R. y Esmer, O.K. (2015). Novel food packaging systems with natural antimicrobial agents. *Journal of Food Science and Technology*, 52(10), 6095–6111. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1780-9>
- International Organization for Standardization. (2015). *ISO/TS 80004-2:2015. Nanotechnologies–Vocabulary–Part 2: Nano-objects*. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:ts:80004:-2:ed-1:vl:en>
- Jenssen, H. y Hancock, R.E.W. (2009). Antimicrobial properties of lactoferrin. *Biochimie*, 91(1), 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2008.05.015>
- Khorshidian, N., Khanniri, E., Mohammadi, M., Mortazavian, A.M. y Yousefi, M. (2021). Antibacterial activity of pediocin and pediocin-producing bacteria against *Listeria monocytogenes* in meat products. *Frontiers in Microbiology*, 12, 709959. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.709959>
- Kou, S., Peters, L.M. y Mucalo, M.R. (2021). Chitosan: a review of sources and preparation methods. *International Journal of Biological Macromolecules*, 169, 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.12.005>
- Lü, J.-M., Lin, P.H., Yao, Q. y Chen, C. (2010). Chemical and molecular mechanisms of antioxidants: experimental approaches and model systems. *Journal of Cellular and Molecular Medicine*, 14(4), 840–860. <https://doi.org/10.1111/j.1582-4934.2009.00897.x>
- Mahmud, J., Sarmast, E., Shankar, S. y Lacroix, M. (2022). Advantages of nanotechnology developments in active food packaging. *Food Research International*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111023>
- Malhotra, B., Keshwani, A. y Kharkwal, H. (2015). Antimicrobial food packaging: potential and pitfalls. *Frontiers in Microbiology*, 6, 611. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00611>
- Mirza, S.K., Asema, U.K. y Kasim, S.S. (2017). To study the harmful effects of food preservatives on human health. *Journal of Medicinal Chemistry Drug Discovery*, 2(2), 610–616.
- Narayanan, K.B., Bhaskar, R. y Han, S.S. (2024). Bacteriophages: natural antimicrobial bioadditives for food preservation in active packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, 276, 133945. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133945>
- Nazzaro, F., Fratianni, F., Coppola, R. y De Feo, V. (2017). Essential oils and antifungal activity. *Pharmaceuticals*, 10(4), 86. <https://doi.org/10.3390/ph10040086>
- Niamah, A.K. (2018). Structure, mode of action and application of pediocin natural antimicrobial food preservative: a review. *Basrah Journal of Agricultural Sciences*, 31(1), 59–69. <https://doi.org/10.37077/25200860.2018.76>

- Niaz, B., Saeed, F., Ahmed, A., Imran, M., Maan, A.A., Khan, M. K. I., Tufail, T., Anjum, F.M., Hussain, S. y Suleria, H.A.R. (2019). Lactoferrin (LF): a natural antimicrobial protein. *International Journal of Food Properties*, 22(1), 1626-1641. <https://doi.org/10.1080/10942912.2019.1666137>
- Ojeda, G.A., Arias Gorman, A.M. y Sgroppo, S.C. (2019). Nanotecnología y su aplicación en alimentos. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotecnología*, 12(23). <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2019.23.67747>
- Pérez-Gago, M.B. y Palou, L. (2016). Antimicrobial packaging for fresh and fresh-cut fruits and vegetables. En S. Pareek (Ed.), *Fresh-cut fruits and vegetables. Technology, physiology, and safety* (pp. 403-452). CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781315370132-13/antimicrobial-packaging-fresh-fresh-cut-fruits-vegetables-mar%C3%A9rez-gago-lu%C3%ADs-palou>
- Perinelli, D.R., Fagioli, L., Campana, R., Lam, J.K.W., Baffone, W., Palmieri, G.F., Casettari, L. y Bonacucina, G. (2018). Chitosan-based nano-systems and their exploited antimicrobial activity. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 117, 8-20. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2018.01.046>
- Pilevar, Z., Hosseini, H., Beikzadeh, S., Khanniri, E. y Alizadeh, A.M. (2018). Application of bacteriocins in meat and meat products: an update. *Current Nutrition & Food Science*, 16(2), 120-133. <https://doi.org/10.2174/157340131466618100115605>
- Pisoschi, A.M., Pop, A., Georgescu, C., Turcuş, V., Olah, N.K. y Mathe, E. (2018). An overview of natural antimicrobials role in food. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 143, 922-935. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2017.11.095>
- Procuraduría Federal del Consumidor. (16 de junio del 2022). *Evita el desperdicio de alimentos*. Gobierno de México. Recuperado 2 de abril de 2024, de <https://www.gob.mx/profeco/documentos/evita-el-desperdicio-de-alimentos>
- Quinto, E.J., Caro, I., Villalobos-Delgado, L.H., Mateo, J., De-Mateo-Silleras, B. y Redondo-Del-Río, M.P. (2019). Food safety through natural antimicrobials. *Antibiotics*, 8(4), 208. <https://doi.org/10.3390/antibiotics8040208>
- Ramos, B., Brandão, T.R.S., Teixeira, P. y Silva, C.L.M. (2020). Biopreservation approaches to reduce *Listeria monocytogenes* in fresh vegetables. *Food Microbiology*, 85, 103282. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2019.103282>
- Rodríguez, J.M., Martínez, M.I. y Kok, J. (2002). Pediocin PA-1, a wide-spectrum bacteriocin from lactic acid bacteria. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 42(2), 91-121. <https://doi.org/10.1080/10408690290825475>

- Sadiq, F.A., Yan, B., Tian, F., Zhao, J., Zhang, H. y Chen, W. (2019). Lactic acid bacteria as antifungal and anti-mycotoxigenic agents: a comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(5), 1403-1436. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12481>
- Siddiqui, S.A., Khan, S., Mehdizadeh, M., Bahmid, N.A., Adli, D.N., Walker, T.R., Perestrelo, R. y Câmara, J.S. (2023). Phytochemicals and bioactive constituents in food packaging-A systematic review. *Heliyon*, 9(11), e21196. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21196>
- Tsuchiya, H. (2015). Membrane interactions of phytochemicals as their molecular mechanism applicable to the discovery of drug leads from plants. *Molecules*, 20(10), 18923-18966. <https://doi.org/10.3390/molecules201018923>
- Vieira, J.N., Gonçalves, C.L., Villarreal, J.P.V., Gonçalves, V.M., Lund, R.G., Freitag, R.A., Silva, A.F. y Nascente, P.S. (2019). Chemical composition of essential oils from the apiaceae family, cytotoxicity, and their antifungal activity *in vitro* against candida species from oral cavity. *Brazilian Journal of Biology*, 79(3), 432-437. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.182206>
- Wagh, R.V., Priyadarshi, R. y Rhim, J.-W. (2023). Novel bacteriophage-based food packaging: an innovative food safety approach. *Coatings*, 13(3), 609. <https://doi.org/10.3390/coatings13030609>
- Wang, B., Timilsena, Y.P., Blanch, E. y Adhikari, B. (2019). Lactoferrin: structure, function, denaturation and digestion. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(4), 580-596. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1381583>
- Wu, T., Jiang, Q., Wu, D., Hu, Y., Chen, S., Ding, T., Ye, X., Liu, D. y Chen, J. (2019). What is new in lysozyme research and its application in food industry? A review. *Food Chemistry*, 274, 698-709. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.017>
- Wyrwa, J. y Barska, A. (2017). Innovations in the food packaging market: active packaging. *European Food Research and Technology*, 243, 1681-1692. <https://doi.org/10.1007/s00217-017-2878-2>
- Yildirim, S., Röcker, B., Pettersen, M.K., Nilsen-Nygaard, J., Ayhan, Z., Rutkaite, R., Radusin, T., Suminska, P., Marcos, B. y Coma, V. (2017). Active packaging applications for food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(1), 165-199. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12322>