

Potencial bioconservante de bacterias ácido-lácticas en recubrimientos comestibles: una revisión

Biopreservative potential of lactic acid bacteria in edible coatings: a review

López Montes, B.¹, Valle Yacila, G.J.², Polanía Rivera, A.M.^{3*}

¹Facultad de Ingeniería Química y Bioquímica, Instituto Tecnológico de Jiquilpan, Dirección: Carretera Nacional S/N, KM 202, Centro, 59514 Jiquilpan de Juárez, Michoacán de Ocampo, México.

²Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Dirección: Calle Higos Urco N°342. Peru.

³Escuela de Ingeniería en Alimentos, Universidad del Valle, Dirección: Tuluá Calle 43 # 43-33 Villacampestre. Colombia.

*Corresponding Author: anna.polania@correounivalle.edu.co

Recibido: 05 de enero de 2026

Aceptado: 27 de junio de 2026

Resumen

A nivel mundial se desechan millones de toneladas de alimentos, lo que representa un problema de interés global relacionado con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 2: Hambre Cero, establecido en la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), cuyo propósito incluye reducir el desperdicio de alimentos y fomentar una producción y consumo responsables. Sin embargo, existen alimentos perecederos cuyo ciclo de vida es muy corto, por lo que requieren tratamientos capaces de prolongar su vida útil.

Actualmente, se emplean diversos conservantes, generalmente químicos, poco amigables con el ambiente e incluso potencialmente dañinos para la salud, lo que ha incrementado el interés por alternativas más naturales, como los recubrimientos comestibles (RCs), los cuales pueden aplicarse mediante diferentes métodos, como inmersión, pulverización, cepillado y aspersión.

Los RCs son elaborados principalmente a base de polisacáridos, proteínas y lípidos, además de otros compuestos bioactivos. En este contexto, la presente revisión sistemática tuvo como objetivo analizar el potencial de las bacterias ácido-lácticas (BAL) incorporadas en RCs para la conservación postcosecha de alimentos perecederos y la inhibición de patógenos como *Mucor racemosus*, *Aspergillus niger*, *Listeria monocytogenes* y *Escherichia coli*.

La búsqueda bibliográfica se realizó bajo la metodología PRISMA en sistemas de información e indización científica como ScienceDirect, Scopus, Redalyc y SpringerLink, considerando publicaciones entre 2016 y 2025. Para ello, se emplearon ecuaciones de búsqueda con palabras clave en español e inglés, tales como “recubrimiento comestible/edible coating”, “bacterias ácido-lácticas/lactic acid bacteria” y “films”, además de los operadores booleanos “AND”, “OR” y “NOT”.

Se encontró que los beneficios de las BAL integradas en RCs incluyen el desarrollo de productos con mayor valor nutricional, la reducción de pérdidas agrícolas y la implementación de métodos de conservación menos dañinos para el medio ambiente. Asimismo, las BAL contribuyen a preservar productos agropecuarios postcosecha y prolongar su vida útil gracias a sus propiedades antioxidantes, antimicrobianas y probióticas, lo cual puede apreciarse desde enfoques bioquímicos, fisicoquímicos, microbiológicos y organolépticos. Estos beneficios generan un impacto positivo para la industria alimentaria y representan áreas de oportunidad para futuras investigaciones. No obstante, aún existen desafíos relacionados con la viabilidad de algunos microorganismos, su compatibilidad con ciertos compuestos, la aceptabilidad en el mercado y la accesibilidad a esta tecnología, debido a las inversiones requeridas en equipo e infraestructura, especialmente para pequeñas y medianas empresas.

Palabras clave: recubrimientos comestibles; bacterias ácido-lácticas; biopreservación; vida útil; probióticos; postcosecha.

Abstract

Millions of tons of food are discarded worldwide, representing a global issue related to Sustainable Development Goal (SDG) 2: Zero Hunger, established in the United Nations (UN) 2030 Agenda, which aims to reduce food waste and promote responsible production and consumption. However, there are perishable foods with very short shelf lives that require treatments to extend their shelf life.

Currently, various preservatives are used, generally chemical ones that are not environmentally friendly and may even be harmful to health. That situation increases the interest in natural alternatives, such as edible coatings (ECs), which can be applied using different methods, including immersion, spraying, brushing, and dipping.

ECs are primarily composed of polysaccharides, proteins, and lipids, as well as other bioactive compounds. In this context, the present systematic review aimed to analyze the potential of lactic acid bacteria (LAB) incorporated into ECs for post-harvest preservation of perishable foods and for inhibiting pathogens such as *Mucor racemosus*, *Aspergillus niger*, *Listeria monocytogenes*, and *Escherichia coli*.

The literature search was conducted using the PRISMA methodology across scientific information and indexing systems such as ScienceDirect, Scopus, Redalyc, and SpringerLink, among others, and included publications from 2016 to 2025. To this end, search queries were used with keywords in Spanish and English, such as "recubrimiento comestible/edible coating," "bacterias ácido-lácticas/lactic acid bacteria," and "films," along with the Boolean operators "AND," "OR," and "NOT."

We found that the benefits of BALs integrated into edible coatings include the development of products with higher nutritional value, reduced agricultural losses, and the implementation of preservation methods that are less harmful to the environment. Likewise, LABs help preserve post-harvest agricultural products and extend their shelf life thanks to their antioxidant, antimicrobial, and probiotic properties, which can be observed from biochemical, physicochemical, microbiological, and organoleptic perspectives.

These benefits have a positive impact on the food industry and offer opportunities for future research. However, challenges remain regarding the viability of certain microorganisms, their compatibility with specific compounds, market acceptance, and access to this technology, due to the required investments in equipment and infrastructure, particularly for small and medium-sized enterprises.

Keywords: edible coatings; lactic acid bacteria; biopreservation; shelf life; probiotics; post-harvest.

INTRODUCCIÓN

La industria alimentaria genera millones de toneladas de desperdicio anual a nivel mundial. Esto es un problema de interés global, pues implica pérdidas económicas, afectaciones ambientales y sociales importantes. Sin embargo, la demanda de alimento incrementa proporcionalmente con la población mundial. Por lo que se planea disminuir el 50 % de los desechos alimentarios generados a nivel mundial para 2030, según el objetivo 2: hambre cero, de la agenda de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) (Hidalgo & Martín-Marroquín, 2020).

Las pérdidas comienzan desde antes de la siembra, cosecha y producción, y llegan hasta el hogar del consumidor. Sin embargo, existen alimentos más propensos a generar pérdida (perecederos), ya que tienen ciclos de vida muy cortos. En la industria se emplea gran diversidad de conservantes por esta necesidad indiscutible de ampliar su vida útil. Pero, la mayoría son sintéticos, lo que conlleva riesgos para la salud humana y el ambiente (Pang et al., 2022). En consecuencia, se buscan técnicas que permitan reducir riesgos para la salud y que sean sostenibles. Un ejemplo de ello son las Bacterias Ácido-Lácticas (BAL) integradas a recubrimientos comestibles (RC), para conservar alimentos, por la amplia gama de productos y subproductos que generan.

Los recubrimientos comestibles (RC) son capas delgadas, que se forman sobre la superficie de los alimentos. Se encuentran compuestos a base de

ingredientes naturales como lípidos, proteína y polisacáridos (Sapna et al., 2024). Debido a que están fabricados por materiales biodegradables, se convierten en una alternativa ecológica a las películas sintéticas y envases tradicionales (Fan et al., 2025). Los RC son aplicados para la preservación de la calidad de frutas y verduras, ya que pueden regular la transferencia de humedad, oxígeno, dióxido de carbono y etileno, retener compuestos de aroma y sabor y reducir daños físicos. Además, pueden ser enriquecidos con compuestos activos y funcionales como antioxidantes, antimicrobianos, nutrientes, vitaminas, agentes anti-pardeamiento, enzimas y probióticos (Panahirad et al., 2021).

La aplicación de los RC se da mediante métodos como la inmersión, pulverización, cepillado y rociado. Su uso dependerá de las características del alimento y del RC (Caiza, 2023). Entre los biopolímeros utilizados en su elaboración se encuentran polisacáridos como la celulosa, almidón, quitosano, alginatos, carragenatos, gelanos y pectinas, así como también proteínas como la gelatina, caseínas, albúminas o suero de leche, zeína y soja (Rosero et al., 2020). En cuanto a lípidos se encuentra la cera de salvado de arroz, aceite de jojoba, cera de polietileno, cera de parafina, cera de abeja y cera de candelilla (Usman et al., 2025).

Dentro del diverso grupo de compuestos que pueden ser agregados a los RC se encuentran las Bacterias Ácido-Lácticas (BAL) (Álvarez et al., 2021). Las BAL son microorganismos gram positivos, no esporulados,

aerobios o anaerobios facultativos muy utilizadas en los procesos de fermentación alimentaria (Akpogheli et al., 2025). Tienen la capacidad de actuar como conservante natural, inhibir microorganismos y patógenos causantes de la descomposición, mediante mecanismos como la producción de ácidos orgánicos, la competencia con patógenos por nutrientes o la síntesis de sustancias antimicrobianas como las bacteriocinas (Li et al., 2024). Entre la variedad de BAL podemos encontrar géneros como *Aerococcus*, *Carnobacterium*, *Enterococcus*, *Lactobacillus*, *Lactococcus*, *Leuconostoc*, *Streptococcus*, *Tetragenococcus*, *Vagococcus* y *Weissella* (Akpogheli et al., 2025).

Autores como Chen et al. (2023), Li et al. (2024) y Torres-García et al. (2024) han estudiado el comportamiento de las BAL con relación al crecimiento de algunos microorganismos (MO) patógenos que está vinculado a la producción de bacteriocinas, (compuestos proteicos de bajo peso molecular) que inhiben el crecimiento microbiano o actúan como bactericida (Moghadas et al., 2024). López-Mendoza et al. (2023) y Chen et al. (2023) reportan que las BAL producen compuestos de alto valor para la industria alimentaria, entre los que se encuentran los ácidos orgánicos (ácido láctico, cítrico, propiónico, acético, orótico, pirúvico, butírico, fórmico, úrico, oxálico), que aportan características importantes como aroma y sabor deseables, al mismo tiempo ofrecen un efecto conservador. Por lo que la integración de agentes antimicrobianos en RC ha demostrado resultados prometedores extendiendo la vida útil de las frutas, limitando la pérdida de peso, barreras contra el oxígeno, preservación de color, entre otras características (Torres-García et al., 2024). Con la implementación de BAL se busca evitar la propagación de MO patógenos como hongos (*Aspergillus*, *Penicillium*, *Alternaria*, *Cladosporium*, *Botrytis* y *Rhizopus*) ya que pueden provocar hasta un 50 % de pérdidas a nivel industrial (Moghadas et al., 2024).

Además, los RC ayudan a inhibir el efecto negativo de algunos microorganismos, y prevenir posibles efectos perjudiciales en el medio ambiente o para la salud del consumidor, lo que contrasta con el uso de fungicidas, plaguicidas, radiaciones gamma y otras técnicas de conservación (Khalfallah et al., 2024). Conforme a lo expuesto anteriormente, el objetivo de esta revisión es

analizar críticamente los avances recientes en el uso de bacterias ácidolácticas (BAL) como componentes en recubrimientos comestibles, destacando sus mecanismos de acción (antimicrobianos y antioxidantes), compatibilidad con matrices poliméricas y eficacia en la conservación de alimentos. Además, se discuten los desafíos tecnológicos y perspectivas futuras para su aplicación a escala industrial.

METODOLOGÍA

Se llevo a cabo una revisión sistemática según la lista de verificación de 27 items y el diagrama de flujo de la Declaración PRISMA (Page et al., 2021). La búsqueda de literatura consistió en seleccionar 62 artículos científicos originales de un total de 150 indexados en las bases de datos Scopus, Dialnet, Scielo, ScienceDirect, PubMed Central®, Redalyc, Springer y Google Académico. Localizados utilizando las palabras clave en español y en inglés: “recubrimiento comestible/edible coating”, “Bacterias Ácido-Láctica/lactic acid bacteria” y “films”. Los descriptores establecidos fueron combinados para obtener resultados de búsqueda más concretos empleando los operadores booleanos “AND”, “OR” y “NOT” en los sistemas de información e indización científica utilizados. De la siguiente manera: "strawberry"OR"fragaria x ananassa"AND"acid lactic bacteria"AND"edible coating".

Los criterios de selección utilizados en el estudio incluyeron: a) artículos científicos originales, de revisión y literatura académica (como complemento para antecedentes conceptuales y contextualización teórica), b) redactados en español o inglés c) con disponibilidad en acceso abierto y d) publicados entre los años 2016 a julio de 2025, considerando publicaciones en línea anticipadas ('ahead of print') disponibles durante el periodo de búsqueda. Posteriormente, se excluyeron manualmente los artículos duplicados o aquellos que dentro del título y resumen no evidenciaron los referentes teóricos relacionados con el tema en estudio.

Una vez definidos los artículos pertinentes, se llevó a cabo su revisión para extraer la información clave. A partir de esta información, se elaboró una matriz que incluyó tanto las referencias bibliográficas como las

estrategias detectadas.

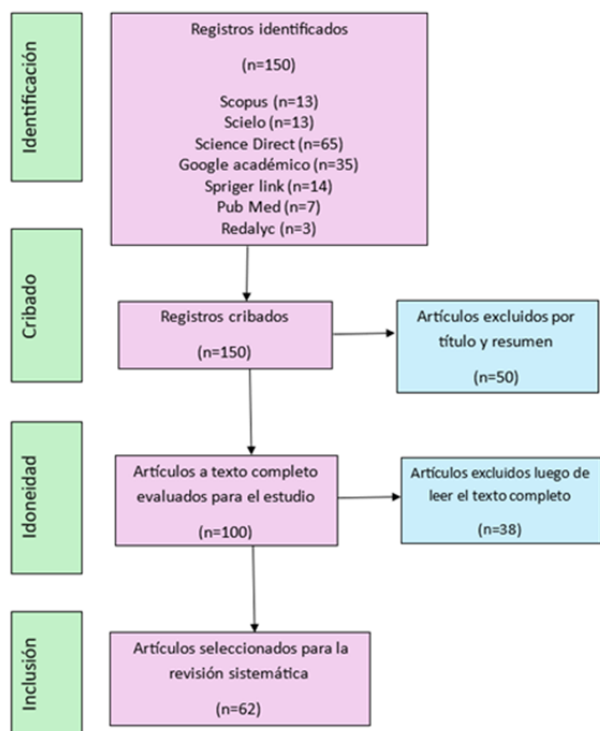


Figura 1. Diagrama de Flujo

RESULTADOS

De la selección realizada a partir de los sistemas de información e indización científica y con base a los criterios definidos por la declaración PRISMA, se identificaron 150 documentos, tal como se muestra en la Figura 1. Siendo excluidos 50 por título y resumen, Por lo que 100 fueron leídos a texto completo, dónde se eliminaron 38 y se conservaron 62. Finalmente, se seleccionaron los artículos que cumplieron los criterios de inclusión para realizar la revisión sistemática.

Recubrimientos comestibles

Los recubrimientos comestibles (RC) son finas capas de compuestos químicos o biológicos que se utilizan para cubrir la superficie de un producto. Estos recubrimientos actúan como una barrera, disminuyendo el paso de gases. Además, logran ralentizar el proceso de maduración, lo que a su vez mejora la calidad del producto y prolonga significativamente su vida útil. Ofreciendo la ventaja de crear una barrera

semipermeable entre el producto y el exterior, controlando el movimiento de humedad, gases y solutos, logrando así retrasar el deterioro y conservar la frescura del producto (Miteluț et al., 2021).

Algunas veces los términos película y recubrimiento comestibles se usan indistintamente. Sin embargo, es importante aclarar que los RC se forman directamente sobre el alimento, por su parte las películas comestibles se producen inicialmente y después se adhieren al alimento (Guimarães et al., 2018).

Los principales materiales que se usan para elaborar RC son naturales, lo cual los hace seguros para el consumo y se consideran una alternativa sostenible para conservar los alimentos. Sus componentes frecuentemente son lípidos, polisacáridos y proteínas, pero en ocasiones suelen adicionarse otros compuestos como disolventes, resinas, y plastificantes para dar una característica específica. Los plastificantes generalmente se adicionan para contribuir a la flexibilidad del RC, los disolventes para otorgar mayor resistencia a tracciones y las resinas para prevenir la permeabilidad al vapor de agua (Galus, 2019).

Además de sus propiedades conservantes, los RC también pueden servir como vehículos para microorganismos probióticos, mejorando la microbiota intestinal del consumidor. En este contexto, la adición de bacterias ácido-lácticas (BAL), reconocidas por sus características probióticas o antimicrobianas, emerge como una tecnología prometedora para potenciar la seguridad alimentaria, alargar la vida útil de los alimentos y ofrecer ventajas significativas para la salud del consumidor (Sun et al., 2022).

Materiales usados para recubrimientos comestibles

En los últimos años, se han utilizado diversos materiales en la formulación de los RC, donde se destacan polisacáridos como (quitosano, celulosa, pectina, almidón, alginato, carragenina), proteína como (gelatina, suero, caseína, proteína de soja) y lípidos como (ceras, aceites, ácidos grasos, resina), complementados con aditivos como las nanopartículas metálicas y los plastificantes. Estos materiales son ampliamente usados por investigadores

debido a que son atóxicos, ecológicos y económicos. Además, son “libre de alérgenos”, estables, insípidos e inodoros (Kumar, 2024).

Polisacáridos

Los polisacáridos son carbohidratos complejos, biocompatibles y biodegradables. Además, poseen propiedades de gelificación espesamiento y estabilización (Sharma et al., 2024). Según su estructura pueden formar RC con características como resistencia a la tracción, hidrosolubilidad y baja extensibilidad. Además, funcionan de barrera contra gases como el oxígeno. Su principal limitación es su naturaleza hidrófila que la hace ineficiente contra la humedad (Silva et al., 2023). Los polisacáridos más utilizados en la elaboración de RC son el almidón, la celulosa, la pectina, el alginato y el quitosano (Anaya et al., 2020).

Alginato

Es un polisacárido obtenido a partir de algas pardas y bacterias (Piña et al., 2021). Es utilizado específicamente por sus propiedades de gelificación, espesamiento y estabilización. Los RC elaborados a base de este polímero se han preparado con aditivos como antioxidantes, agentes anti-pardeamiento, antimicrobianos y bacterias probióticas. Se ha demostrado su utilidad en la conservación de tomates, melocotones, cerezas dulces y ciruelas (López & Aldana, 2019).

Quitosano

El quitosano es un heteropolisacárido, que se caracteriza por su biodegradabilidad, biocompatibilidad, funcionalidad, ausencia de toxicidad, alta adherencia, propiedades antimicrobianas y antifúngicas. Este puede ser obtenido de fuentes naturales, a partir de la desacetilación de la quitina. Factores como la baja viscosidad, la temperatura de secado, modo de preparación, la concentración, tipo de ácido usado en la disolución y el grado de des acetilación pueden afectar la efectividad del RC. Por lo tanto, una alternativa de mejora es la funcionalización mediante la incorporación de

compuestos orgánicos, inorgánicos y/o biológicos (Anaya et al., 2020). Es uno de los polisacáridos más investigados, ya que se ha demostrado su eficiencia en la conservación de frutas, como las fresas, mangos, maracuyá, uva de mesa, chirimoya, melón, mandarina y guayaba recién cortada (Lieu et al., 2025).

Lípidos

Los lípidos son biomoléculas o compuestos hidrofóbicos utilizados en la elaboración de RC debido a su capacidad de servir como barrera frente a la humedad. Los RC compuestos a base de lípidos se caracterizan por ser más frágiles y tener mayor grosor. Estos se usan junto a proteínas y polisacáridos para formar recubrimientos con mejores características mecánicas, aunque estos pueden tener una mayor permeabilidad al vapor de agua que recubrimientos hechos únicamente de lípidos. Sin embargo, presenta algunas desventajas, ya que se ha reportado que los RC formados a base de lípidos pueden dañar la apariencia y el brillo de los productos cubiertos (Hassan et al., 2018). Entre los lípidos más utilizados se encuentran las ceras, ácidos grasos, las resinas y los lípidos neutros (Devi et al., 2024).

Cera de abeja

Es un material lipídico hidrofóbico complejo con puntos de fusión bajos (63-65 °C). Se obtiene de la secreción de las glándulas de cera de las abejas. Se caracteriza por su estabilidad, bajo punto de fusión, naturaleza hidrofóbica que la convierte en excelente barrera frente a la humedad (Kumar, 2024). Su característica hidrofóbica se debe a la presencia de hidrocarburos de cadena larga, ésteres de ácidos largos y compuestos exógenos (Singh, 2024). La cera de abeja es el lípido que se usa frecuentemente en la formulación de RC a base de otros polímeros que presentan limitaciones en cuanto a permeabilidad del agua (Formiga et al., 2019).

Resinas

Son compuestos vegetales no volátiles que se adquieren del goteo de las plantas, cortes o infecciones. Se

caracterizan por ser solubles en disolventes orgánicos. Además, son amorfas, estables, inertes y se vuelven pegajosas al calentarse, son fusibles y carecen de puntos de fusión definidos. Entre ellas se encuentra la cumarona indeno, colofonia de madera y goma laca.

La goma laca se compone de ésteres con grupos hidroxilo y carboxilo, y se caracteriza por tener buenas propiedades de barrera y propiedades filmógenas.

La colofonia es un subproducto de la resina de pino, se ha utilizado como compatibilizante, estabilizante y plastificante, debido a que mejora las propiedades viscoelásticas, de tracción, flexibilidad y compatibilidad de la matriz polimérica (Devi et al., 2024).

Aceites esenciales

Son combinaciones lipofílicas o hidrofílicas de varios químicos volátiles y no volátiles. Se categorizan como terpenos, terpenoides y fenilpropanoides. Se caracterizan por tener efectos antimicrobianos, debido a que presentan compuestos fenólicos como eugenol, timol y carvacrol, junto con otros terpenos y cetonas. Entre los aceites más importantes se encuentran el aceite de orégano, aceite de clavo, aceite de tomillo, aceite de hierba de limón, aceite de oliva y aceite de coco. Otro de los aceites más utilizados se encuentra el aceite esencial de canela que tiene capacidad antimicrobiana debido a que se compone de cinamaldehído (Permana et al., 2021).

Proteínas

Las proteínas son biopolímeros que se obtienen de subproductos animales y vegetales. Estos se pueden utilizar para la elaboración de películas y RC (Silva et al., 2023). Según Payal et al. (2025) es el polímero que más se utiliza para la formación de películas, debido a sus propiedades de resistencia, nutricionales, cohesivas/adhesivas y de biodegradabilidad. Entre las que más se utilizan se encuentra la caseína, el suero de leche, la zeína y la proteína de soja.

Proteína de soja

Es una proteína globular e hidrosoluble, ampliamente utilizadas en la elaboración de películas y RC, ya que se caracterizan por presentar mejores propiedades de barrera frente al oxígeno y la humedad que polisacáridos como el almidón y la celulosa, lípidos y otras proteínas, especialmente en condiciones de baja humedad. Sin embargo, la presencia de alérgenos, la alta permeabilidad a la humedad y sus deficientes propiedades mecánicas limitan su uso (Payal et al., 2025).

Zeína

Es una proteína de almacenamiento del maíz que se caracteriza por su biodegradabilidad, propiedades para la formación de RC, estabilidad frente al calor y la humedad. Por ello es una potencial alternativa para la elaboración RC que actúen como barrera frente a la luz, humedad, oxígeno y contaminaciones microbianas (Chen et al., 2022). Es muy usado en RC para productos hortofrutícolas, cárnicos y lácteos (Payal et al., 2025).

Proteína de suero de leche

Uno de los grandes problemas que enfrenta el sector agroalimentario es la gestión de subproductos debido a los altos costos asociados a su eliminación y las regulaciones ambientales. Una de las industrias que genera millones de toneladas de subproductos anuales es el sector lácteo, siendo el suero de leche uno de los principales subproductos, que contiene alta carga de nutrientes, pero representa un riesgo ambiental debido a la alta demanda biológica de oxígeno (Etxabide et al., 2023). El concentrado que se deriva a partir del suero de leche conocido en inglés por las siglas (WPC; Whey protein concentrate), se considera un biopolímero muy prometedor debido a su excelente capacidad de barrera de oxígeno, buenas propiedades filmógenas y biodisponibilidad (Khin et al., 2024). Algunas de las propiedades de estos recubrimientos es el retraso en reacciones oxidativas, la reducción en pérdida de humedad y mitigar el pardeamiento enzimático en frutas y vegetales (Xin et al., 2023). Sin embargo, presentan una desventaja y es el bajo rendimiento como barrera a la transferencia de gases debido a su naturaleza hidrofílica. Por esta razón, es

necesario incorporar plastificantes para lograr una mejor flexibilidad de la película y manejo mecánico sin comprometer la integridad de barrera (Kumar et al., 2023, 2024).

Colágeno

El colágeno, un compuesto de origen animal el cual puede ser extraído a partir de tendones, ligamentos, piel, córnea y huesos, no tóxico, ampliamente disponible y comestible, es un material adecuado para formar películas debido a su comestibilidad, flexibilidad, así como alta biodegradabilidad (Li et al., 2024). Es importante mencionar que los materiales de colágeno disponibles de forma comercial suelen ser moléculas únicas de tropocolágeno con una estructura triple hélice que es un producto de degradación de nivel inferior del colágeno natural. Por esta razón, estos materiales presentan propiedades inadecuadas para aplicaciones de envasado y son menos resistentes al agua y las enzimas si se compara con el colágeno natural (Yang et al., 2019).

El enfoque más convencional para mejorar las propiedades de los materiales de colágeno tradicionales es la reticulación ya sea con agentes químicos como el glutaraldehído o con enzimas como las transglutaminasas (Zheng et al., 2023). Aunque la reticulación del colágeno mejora las propiedades mecánicas y de barrera, una reticulación excesiva o inducida químicamente puede reducir la biocompatibilidad debido a la presencia de agentes residuales citotóxicos y a las modificaciones estructurales de la matriz proteica.

Gelatina

La gelatina, un biopolímero biodegradable derivado principalmente del colágeno, posee gran potencial en el envasado sostenible de alimentos debido a sus propiedades antioxidantes, antimicrobianas y filmógenas. No obstante, su aplicación se limita por su baja resistencia a la humedad y mecánica, además de preocupaciones éticas sobre su origen. Para mejorar sus propiedades, se han desarrollado estrategias como el uso de agentes reticulantes, la incorporación de nanomateriales y la mezcla con otros biopolímeros, con el fin de aumentar su estabilidad, capacidad barrera y

resistencia al agua (Reji et al., 2025).

Fuente microbiana (Bacterias ácido-lácticas)

La incorporación de bacterias probióticas en recubrimientos comestibles ha surgido como una estrategia innovadora para conferir beneficios funcionales y potenciales efectos positivos para la salud de los consumidores. Aunque los probióticos se han utilizado tradicionalmente en productos lácteos, recientemente se ha explorado su incorporación en otras matrices alimentarias, como frutas, productos cárnicos y productos de panadería, lo cual representa desafíos relacionados con la estabilidad y viabilidad de los microorganismos durante el procesamiento y almacenamiento (Espitia et al., 2016; Pereira et al., 2022). En este contexto, los recubrimientos comestibles han sido estudiados como sistemas de transporte y protección de microorganismos vivos, favoreciendo su supervivencia en la superficie de los alimentos y durante su vida útil (Silva et al., 2023). Para la aplicación exitosa de esta tecnología, es fundamental considerar factores como la composición del recubrimiento, el método de elaboración y las condiciones de almacenamiento, particularmente la temperatura y la humedad relativa, debido a su influencia sobre la viabilidad de los probióticos (Pereira et al., 2022; Xu et al., 2020).

Ventajas y limitaciones en la incorporación

BAL

En los últimos años diversas investigaciones han destacado el uso de BAL en diferentes matrices alimentarias. Los estudios presentados en la Tabla 1 destacan la compatibilidad de diversas BAL con RC en donde se obtuvo que mejoró su funcionalidad y eficiencia en la conservación de productos agropecuarios, debido a sus propiedades antimicrobianas y antioxidantes. Asimismo, le proporcionó propiedades probióticas que podrían ser beneficiosas para la salud humana. Además, en algunos estudios se evaluó su aceptabilidad, Khodaei & Hamidi (2019) reportaron que los RC (carboximetilcelulosa) con *Lactobacillus plantarum* a diferentes concentraciones no afectaron negativamente la aceptabilidad sensorial de fresas.

Un ejemplo claro donde se refleja la ventaja del uso de BAL o sus metabolitos es en el estudio realizado por Alegre Vilas et al., (2020), donde se demostró que la aplicación de RC a base de celulosa y nisina en mango es capaz de disminuir la concentración de *Listeria monocytogenes* a límites indetectables en un periodo de sólo 4 días. En cambio, este MO patógeno en la misma fruta, pero sin bacteriocinas, ni recubrimiento, presentó concentraciones de hasta 106 UFC/g.

Así como la incorporación de BAL provenientes del mucilago de cacao variedad CCN-51 al 10 % a un RC aplicado por aspersión en un estudio realizado por Erazo Solórzano et al. (2020) ha demostrado mantener e incluso mejorar las propiedades sensoriales de la fruta en comparación al control, luego de ser almacenadas durante 14 días a temperatura ambiente (25 °C), según la prueba de escala hedónica de 4 puntos (Me gusta mucho, me gusta, ni me gusta ni me disgusta y me disgusta) con 20 panelistas, no entrenados. Donde los investigadores destacan una conservación adecuada y una extensión en el tiempo de vida útil de la papaya. Con una aceptabilidad de 95 % para la fruta con BAL, frente a un 70 % de la fruta sin BAL.

Preparación del recubrimiento

Usualmente la elaboración de los RC inicia seleccionando los materiales base adecuados, ya sean polisacáridos, proteínas, lípidos o una combinación de estos (Figura 2).

Generalmente se diluyen o dispersan en un solvente (comúnmente agua), adicionando plastificantes para aumentar la flexibilidad y cohesión del recubrimiento. El pH, concentración y temperatura se ajustan para alcanzar las propiedades requeridas. Esto corresponde a una formulación ‘base’, a la cual pueden adicionarse aditivos como agentes antimicrobianos (bacterias ácido-lácticas, aceites esenciales), antioxidantes o colorantes. Esta mezcla debe calentarse y agitarse hasta que sea homogénea. Posteriormente, enfriarse y aplicarse al producto a través de diferentes mecanismos como aspersión, inmersión o lecho fluidizado. Finalmente, el producto recubierto debe secarse para que el solvente se evapore y queda una capa muy fina del material de RC (Suhag et al., 2020; ver figura 3).

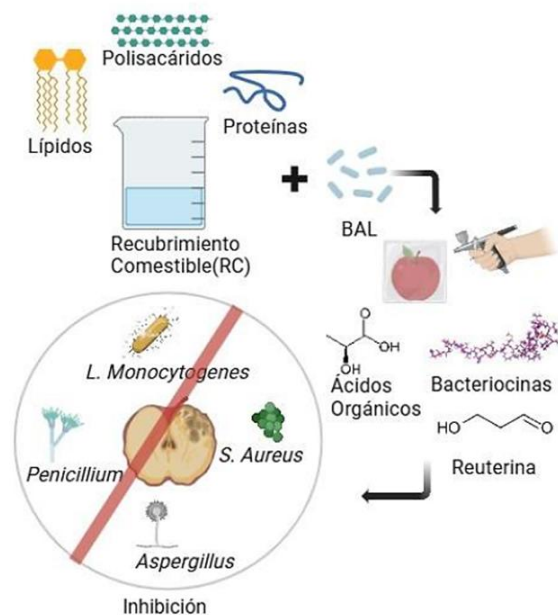


Figura 2. Propiedades de un RC enriquecido con BAL. Creado con BioRender.com

Mecanismos de acción de BAL en recubrimientos

Las BAL son microorganismos capaces de producir ácidos orgánicos al fermentar carbohidratos. Representados por diferentes géneros que cuentan con características metabólicas, morfológicas y fisiológicas compartidas. Con potencial efecto de inhibir el crecimiento microbiano (Erazo Solórzano et al., 2020). Sin embargo, su eficacia depende de la bacteria, así como del hongo o MO patógeno que se desee controlar. Ya que esta propiedad se debe a la producción no sólo de ácidos orgánicos y bacteriocinas, sino también antibióticos y productos como diacetilo, dióxido de carbono (CO₂), etanol, acetaldehído, peróxido de hidrogeno (Fernández et al., 2016).

Algunos ejemplos del potencial de las BAL incorporadas a los RC se presentan a continuación. Un estudio realizado por Álvarez et al. (2021) reportó que se detuvo el crecimiento de hongos como *Fusarium* sp. y *Rhizopus stolonifer* en tomate cherry, con la implementación de un RC compuesto por EPS (exopolisacárido) de *W. confusa* JCA4 y *L. plantarum* A6 extendiendo su vida útil a 28 días en refrigeración (4 °C) comparados con la muestra control (sin recubrimiento)

que presento mesófilos, mohos y levaduras desde el sexto día hasta finalizar el período de almacenamiento. La viabilidad de las bacterias integradas en el RC se mantuvo por encima de 10^{-1} UFC/g, lo que no interfirió con la cantidad disponible de sustrato para la supervivencia de la cepa, así como tampoco influyeron las condiciones de almacenamiento. Observando una tendencia considerable para la reducción de viabilidad con el transcurso del tiempo, sin embargo, se mantuvieron grandes concentraciones de la cepa bacteriana sin que disminuyeran repentinamente. Además, el uso de EPS contribuyó a que se formaran biopelículas sobre el tomate y a la protección de las BAL frente a factores externos como los MO patógenos.

También se ha destacado la efectividad de las bacterias ácido-lácticas frente a *Mucor racemosus*, *Aspergillus niger*, *L. monocytogenes*, y *E. coli* (Silva et al., 2023b). Además, Darbandi et al., (2022) revela que las BAL con amplio espectro antimicrobiano llegan incluso a provocar lisis (muerte celular) en diversos patógenos. En investigaciones como la de Fernández et al., (2016) a través de la experimentación con RC donde se integraron BAL aplicados a frutas postcosecha, se reportó una tendencia menor para la tasa de madurez de la fruta.

Inhibición de patógenos

Un ejemplo de estos compuestos con gran espectro antimicrobiano que inhibe patógenos como: *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes* y *Clostridium botulinum* es la nisina, clasificada como bacteriocina termoestable, sensible a proteasas digestivas y no tóxica, que puede ser obtenida de cepas de *Lactococcus lactis* localizadas en alimentos fermentados y leche sin pasteurizar (García-Tarabay 2017).

Según Rada-Lida (2023) mientras ocurre el proceso fermentativo en salchichas de pescado, las BAL inoculadas descomponen carbohidratos simples (pentosas o hexosas) durante el proceso de metabolización. Mediante rutas alternativas a la glucólisis, específicamente las vías del monofosfato de hexosa o pentosa. Lo cual incrementa la biosíntesis de compuestos orgánicos como ácido láctico y favorece la producción de ácido acético (Belleggia et al., 2022).

Las bacteriocinas actúan en la membrana citoplasmática para interferir con la fuerza motriz de los

protones, de manera que migran a regiones de la membrana con potencial electroquímico como las vesículas energizadas (Plaza-Díaz et al., 2019). El mecanismo de acción se basa en alterar la permeabilidad e integridad de la estructura intermembranal de la célula a través de la formación de poros (Darbandi et al., 2022).

En primer lugar, ocurre la transcripción génica y la traducción de los péptidos precursores, dando lugar a la síntesis inicial de una bacteriocina inactiva. Posteriormente, tienen lugar modificaciones postraduccionales (PTM, por sus siglas en inglés; Post-Translational Modifications; Teber & Asakawa, 2024). Algunas bacteriocinas requieren modificaciones postraduccionales para adquirir su forma activa, y las enzimas responsables de dichos cambios suelen estar codificadas dentro del mismo grupo de genes. Posteriormente, se lleva a cabo la secreción de las bacteriocinas maduras, proceso fundamental en el que participan proteínas transportadoras, frecuentemente del tipo ABC (ATP-Binding Cassette), encargadas de exportarlas fuera de la célula (Menéndez-Cañamares et al., 2024). Los genes encargados de estos procesos se describen a continuación.

- Gen estructural: codifica el péptido precursor, correspondiente a la forma inactiva de la bacteriocina.
- Genes de enzimas de modificación: en bacteriocinas que requieren modificaciones postraduccionales (PTM), estos genes codifican las enzimas necesarias para activar el péptido precursor.
- Genes transportadores: codifican proteínas encargadas de transportar o exportar las bacteriocinas maduras fuera de la célula.
- Genes de inmunidad: codifican proteínas que protegen a la célula productora frente a la acción de sus propias bacteriocinas, otorgándole mecanismos de autoresistencia.

Mecanismos como la formación de canales transmembranales o la desestabilización de la membrana plasmática del hospedero son responsables de inhibir el desarrollo de una amplia gama de microorganismos (MO), disminuyendo la cantidad de toxinas producidas por estos

patógenos (Ibrahim, 2019).

Las bacterias ácido-lácticas desempeñan un papel primordial en la bioconservación de alimentos mediante la fermentación de carbohidratos, proceso que ocasiona una disminución del pH. Cuando el pH desciende por debajo de 4.5, se generan ácidos orgánicos que actúan como potentes inhibidores del crecimiento de microorganismos patógenos (Speranza et al., 2017). Por lo tanto, los parámetros cruciales en un proceso de bioconservación incluyen la temperatura, el pH y la concentración de cloruro de sodio (NaCl), la cual generalmente se mantiene entre 2 y 4 % (Racioppo et al., 2022). Además, las BAL producen exopolisacáridos (EPS), biopolímeros sintetizados durante el crecimiento y metabolismo bacteriano. Los EPS poseen propiedades funcionales, como la mejora de la textura en alimentos fermentados y la inhibición del desarrollo de patógenos. Por ejemplo, los EPS producidos por *Lactobacillus gasseri* han demostrado actividad inhibitoria frente a *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* y *Staphylococcus aureus* (Silva et al., 2023b).

Antioxidación

El deterioro postcosecha de las frutas se debe a una serie de reacciones enzimáticas y no enzimáticas que comprometen la calidad del fruto. Durante este período, la actividad de enzimas degradadoras de la pared celular, como pectina metilesterasa, celulasa y poligalacturonasa, resulta particularmente relevante (Yıldırım-Yalçın et al., 2022). Estas enzimas hidrolizan los polisacáridos estructurales de la pared celular, transformándolos en compuestos de menor peso molecular y mayor solubilidad. A nivel macroscópico, esta degradación se manifiesta como una disminución de la firmeza y un ablandamiento de la textura de las frutas (Moghadas et al., 2024).

Es importante destacar que la actividad de estas enzimas puede atenuarse significativamente mediante la reducción del contacto de la fruta con el oxígeno. Sin embargo, la exposición excesiva a este gas también induce estrés oxidativo en el tejido vegetal, lo que conlleva la degradación de nutrientes esenciales y compuestos nutracéuticos, además de alterar los perfiles de sabor y los pigmentos naturales del fruto (Iñiguez-Moreno et al., 2024). Los mecanismos antimicrobianos de las bacterias ácido-lácticas (BAL) se muestran en la figura 4.

Modificación de la microestructura del recubrimiento

Los RC funcionan como barreras protectoras, controlando el intercambio de oxígeno, humedad, dióxido de carbono, así como el sabor y el aroma, entre el alimento y el ambiente exterior. Al hacerlo, ralentizan el deterioro y extienden la vida útil del producto (Moghadas et al., 2024). Un ejemplo de ello es un RC formulado con alginato y *L. rhamnosus* que fue el más eficaz de los realizados por Li et al. (2024), luego de ser sometido a análisis fisicoquímicos donde se reveló una disminución favorable de la tasa de pérdida de peso, el índice de putrefacción y la pérdida de ácido ascórbico en fresas. Por otra parte, aplicar recubrimientos a base de EPS muestra un retardo en el ablandamiento del alimento tratado, disminuyendo la tasa de respiración y pérdida de peso. Y al mismo tiempo, retrasando cambios fisicoquímicos y el desarrollo de microorganismos indeseables al almacenar el fruto (Álvarez et al., 2021).

Aplicaciones en alimentos

Productos cárnicos

Las bacterias ácido-lácticas producen bacteriocinas, que son sustancias naturales que pueden usarse para combatir la *Listeria monocytogenes*, una bacteria peligrosa que contamina los alimentos cárnicos principalmente. Por otro lado, los recubrimientos de biopolímeros con propiedades antimicrobianas son muy útiles para envasar y conservar los alimentos de manera más segura. Esto se evidencia en algunas investigaciones realizadas recientemente.

En un estudio realizado por Odila Pereira et al. (2018) incorporaron cepas de *Bacillus animalis* y *Lactobacillus casei* en recubrimientos comestibles a base de proteína de suero para aplicar en lonchas de jamón. Estos RC inhibieron el crecimiento detectable de *Staphylococcus spp.*, *Pseudomonas spp.*, *Enterobacteriaceae* y mohos/levaduras, al menos durante 45 días de almacenamiento a 4 °C. Además, el producto recubierto exhibió menor pérdida de peso y no se detectaron cambios en el color ni el pH, demostrando las ventajas de incorporar las BAL en este tipo de recubrimientos.

Gutián et al. (2019) evaluaron las enterocinas sintetizadas por *Enterococcus ayium* DSMZ17511 con el objetivo de

determinar su actividad contra *L. monocytogenes*, estas bacteriocinas fueron incorporadas en recubrimientos comestibles de agar que fueron aplicados en trozos de queso contaminados de forma intencional con *L. monocytogenes* 01/155. Sus resultados evidenciaron una reducción de al menos 1 unidad logarítmica en la viabilidad de *L. monocytogenes*. Esto fue posible gracias a la humedad del queso el cual facilitó la rápida difusión de los antimicrobianos. Por lo cual, la aplicación de estos RC son una alternativa viable y de bajo costo para controlar de forma segura a *L. monocytogenes*.

Frutas y verduras

Una de las áreas con mayor potencial para la aplicación de recubrimientos comestibles, con propiedades antimicrobianas, es el sector de la fruta fresca. Li et al. (2024b) realizaron un recubrimiento a base de alginato de sodio empleando específicamente cepas de *Lacticaseibacillus paracasei*, *Lacticaseibacillus rhamnosus* y *Lacticaseibacillus plantarum* como agentes antimicrobianos y evaluaron su efectividad en fresas. Los resultados mostraron que el recubrimiento con *L. rhamnosus* redujo sustancialmente la tasa de pérdida de peso, el índice de descomposición y la pérdida de ácido ascórbico en las fresas. Respecto a los análisis que simulaban el tracto intestinal, *L. paracasei* presentó la mayor tasa de supervivencia cuando se expuso fluido gástrico. Por otro lado, *L. plantarum* demostró una mayor resistencia tras la exposición a fluido intestinal simulado. En otro estudio realizado por (Manjarres Melo et al. 2021), evaluaron *Lactiplantibacillus plantarum* A6 al ser incorporada en un RC a base de exopolisacárido de *Weissella confusa* JCA4 sobre tomates cherry. Fue posible evidenciar que la aplicación de este RC retrasó eficazmente el ablandamiento del fruto, redujo la pérdida de peso y la tasa de respiración, y retrasó los cambios en la calidad fisicoquímica de los tomates cherry durante el almacenamiento. Además, este RC inhibió el crecimiento de los hongos *Fusarium* sp. y *Rhizopus stolonifer*. Esto se traduce en una alternativa prometedora para controlar el deterioro fúngico y mantener la calidad postcosecha. Wong & Li, (2023) exploraron dos estrategias para determinar el efecto antagonista de las BAL contra *L. monocytogenes* en rodajas de manzana. La primera consistió en hacer la prefermentación de

Lactiplantibacillus plantarum 299v con glucosa y extracto de levadura. La segunda estrategia fue analizar las BAL psicrófilas (pLAB) y seleccionaron un aislado *Leuconostoc gelidum* subsp. *gelidum*. La primera estrategia presentó un efecto inhibitorio contra algunas cepas de *Listeria* tales como SSA151, LM24, LM44 y BAA-839, respecto a la segunda, presentó un recuento de 6.7 ± 0.1 log UFC/g. Es decir, que ambas estrategias son viables para la inhibición de *L. monocytogenes*, además aportan beneficios a la salud del consumidor por el efecto probiótico.

Además de las bacteriocinas, las BAL también son productoras de biosurfactantes (componentes anfifílicos que pueden usarse como aditivos en recubrimientos comestibles para prevenir la adhesión microbiana al reducir la tensión superficial en la superficie de los frutos). Además, crean una barrera contra la humedad y disminuyen los cambios fisiológicos en las frutas (Rosalinda et al., 2024).

Rosalinda et al. (2024) aislaron y caracterizaron cepas productoras de biosurfactantes de bacterias ácido-lácticas de Dadijah (un alimento local del oeste de Sumatra-Indonesia) y evaluaron su eficacia en la incorporación de un RC aplicado en fresas. Los resultados revelaron que los aislados de Dadijah seleccionados comprendían bacterias ácido-lácticas de *Lactiplantibacillus* sp. y *Meyerozyma* sp. El aislado *L. plantarum* fue seleccionado debido a su mayor valor de emulsificación. Cuando se incorporó este biosurfactante al RC con quitosano, las tasas de actividad antibacteriana y antiadherente en *Escherichia coli* ATCC 8739 fueron del 18.79 ± 5.23 % y del 55.26 ± 0.02 %, mientras que en *Staphylococcus aureus* ATCC 6738 fueron del 31.60 ± 2.63 % y del 74.63 ± 0.00 % a una concentración de 3000 mg/L; lo que demuestra su potencial para reducir el deterioro de la fruta.

Productos lácteos

Las etapas de almacenamiento y posprocesamiento representan momentos críticos en la producción de queso, ya que son propicias para la contaminación por bacterias, mohos y levaduras. Esta contaminación microbiana puede ocasionar la aparición de sabores indeseables, lo que afecta directamente la calidad y seguridad del producto. El riesgo es particularmente alto en el queso que se almacena sin un embalaje adecuado.

Por lo cual, el uso de RC en la maduración o almacenamiento podría ayudar a solucionar estos problemas y extender la vida útil (Costa et al., 2018).

Un estudio reciente, liderado por (El-Sayed et al., 2021) evaluó la efectividad de un RC formulado a partir de quitosano, alginato de sodio y carboximetilcelulosa. Estas matrices poliméricas se reforzaron con celulosa microcristalina antimicrobiana (AMCC) y se enriquecieron con cepas seleccionadas de lactobacilos y bacilos para potenciar su efecto conservante en quesos blandos. Los resultados mostraron que este RC exhibió una notable actividad antimicrobiana frente a un amplio espectro de patógenos relevantes en la industria alimentaria, incluyendo bacterias como *S. aureus*, *S. enterica ser. Typhimurium*, *L. monocytogenes*, *E. coli* y *B. cereus*, así como hongos como *Aspergillus niger* y *A. flavus*. Además, este RC logro mantener la frescura y aceptación sensorial hasta por 45 días.

Otra investigación donde se observan resultados positivos es la de Silva et al. (2022), quienes incorporaron cepas inmovilizadas de *Lactococcus lactis* y *Lc. garvieae* en un recubrimiento de alginato-maltodextrina-glicerol aplicado en queso. Este recubrimiento demostró un efecto bacteriostático al controlar el crecimiento de *L. monocytogenes* en la superficie del queso. Además, no solo impidió que la bacteria se propagara hacia el interior del producto, sino que también inhibió el crecimiento de otras bacterias responsables del deterioro durante el almacenamiento.

DISCUSIÓN

Áreas de oportunidad

Aplicar directamente BAL en productos cárnicos puede provocar reacciones entre estos MO y los nutrientes del alimento, lo cual reduciría el contenido nutricional y con ello se puede ver afectada la actividad de las bacteriocinas (Peng et al., 2023).

En cuanto al uso de BAL en alimentos, es posible si la cepa se encuentra clasificada como segura (GRAS) por la Food and Drug Administration (FDA) o como presunción de seguridad calificada (QPS) por la European Food Safety Authority (EFSA). De lo contrario se deben realizar pruebas de seguridad alimentaria previamente, así como elaborar un informe con sus características basadas en estudios científicos y presentarlo a las organizaciones

mencionadas anteriormente, que se encargan de avalar el uso seguro de estos MO (Rondón et al., 2020).

Pero esto no es todo, una vez que se aprueba su incorporación al producto en el RC, es necesario cumplir con las normas de etiquetado de los o el país en que se va a elaborar y comercializar el producto. Así como respetar las dosis preestablecidas, condiciones de almacenamiento, correspondientes al alimento específico del que se trate. Además de adaptarse a los requerimientos de las organizaciones regulatorias que incluye auditorias y revisiones constantes, durante el proceso de elaboración y distribución del producto, buscando garantizar la protección de los derechos del consumidor. Por ejemplo, en México la COFEPRIS (Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios), en Colombia el INVIMA (Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos), o en Perú la DIGESA (Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria).

Por lo general la aplicación de RC con BAL es en alimentos perecederos (carne, leche, frutas). Teniendo en cuenta que no deben existir cambios en las propiedades organolépticas del alimento. El uso de estos MO debe ser controlado y seguro para el consumo humano, como también aportar alguna ventaja para el consumidor, es decir, su implementación debe estar justificada (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura., 2018).

La implementación, almacenamiento y cultivo de BAL es económico. Por lo que es uno de los MO más utilizados en la industria alimentaria, ya sea para alimentos fermentados lácteos o no. Sin embargo, es necesario determinar la estabilidad de los compuestos, propiedades antimicrobianas y fisicoquímicas, previo a su incorporación en el alimento (Akpogheli et al., 2025).

A consecuencia de esto, es fundamental el uso de tecnología especializada; para ello, es indispensable contar con un laboratorio ya sea propio de la empresa o contratado por la misma, para realizar varias pruebas microbiológicas con el fin de obtener la detección oportuna de algunos patógenos. Por lo que las condiciones en las que se encuentren las instalaciones y equipos son un factor clave a considerar. Algunos laboratorios no cuentan con las instalaciones adecuadas para el análisis de patógenos como *Escherichia coli* O157, por ejemplo. Y si

no se pueden hacer las adecuaciones, debe solicitarse el apoyo de otro laboratorio o en su defecto contratar uno particular. Es necesario también, que el laboratorio seleccionado para los análisis este certificado por un sistema reconocido, cumpliendo con la norma ISO-17025 o una similar (Microbiological AnalysisKey Considerations, 2021).

Además, el desarrollo de las BAL puede verse afectado por concentraciones de acidez, salinidad del medio, conservantes y aditivos químicos, etc. Debido a esto, a nivel industrial se requiere de equipo especializado para un crecimiento microbiano óptimo. Como biorreactores y fermentadores, que han sido diseñados para el cultivo de MO, pero dependen de diversos parámetros de medición (pH, temperatura, presión y oxígeno disuelto), que deben ser monitoreados y controlados de manera constante con el objetivo de maximizar la producción, disminuir pérdidas y aumentar la automatización del proceso para optimizarlo. De manera que se reduzca el tiempo de producción sin perder calidad en el producto (Bejar-Caceres, 2024). Adquirir estos equipos puede ser costoso al tratarse de tecnología especializada, al igual que el transporte y almacenamiento incrementa su valor, comparado con la aplicación tradicional de ceras, al tener en cuenta que es necesario mantener condiciones específicas de temperatura y humedad para garantizar la actividad y viabilidad de las bacterias; por lo que la inversión inicial se volvería significativa para pequeñas y medianas empresas.

Ventajas e implicaciones futuras

En la industria alimentaria se emplea una gran diversidad de conservantes por la necesidad indiscutible que existe de incrementar el tiempo de vida de los alimentos. Y teniendo en cuenta que la mayoría de los conservantes son sintéticos, elaborados químicamente, lo que los vuelve poco accesibles económicamente y su consumo conlleva riesgos considerables para la salud humana (Pang et al., 2022). Se ha vuelto indispensable emplear técnicas innovadoras que permitan reducir el riesgo para la salud del consumidor. Por ello, las BAL integradas a RCs son una excelente alternativa para conservar alimentos por la amplia gama de productos y subproductos que generan. De los más mencionados actualmente son las bacteriocinas, debido a su prometedor

potencial en la calidad microbiológica de los alimentos, reportado por múltiples grupos de investigación. Aún cuando es mínima su comercialización, ya que son naturales, se vuelven una alternativa bastante significativa para la industria alimentaria. Sobre todo, porque los consumidores que desean alimentos inocuos y sin aditivos artificiales las demandan (Bautista & Barrado, 2023).

Con el estudio de las BAL en RC y el desarrollo de tecnologías emergentes en la conservación de alimentos, se han desarrollado nuevas técnicas para mejorar la eficiencia de las BAL en RC, como por ejemplo la aplicación de irradiación gamma en sobrenadantes de BAL para mejorar la actividad antimicrobiana y conservación de propiedades fisicoquímicas como la humedad, acidez titulable total (ATT), sólidos solubles totales (SST) y fenoles. Por lo tanto, es importante considerar tecnologías emergentes, para complementar los métodos tradicionales de uso de BAL en RC que permitan mejorar su efecto en la conservación de los alimentos. A partir de ello podemos observar que hay una tendencia a reemplazar los métodos tradicionales de uso de BAL en RC por métodos y materiales más eficientes, amigables con el medio ambiente y que sean más aptos para el consumo humano. █

Tabla 1. Matrices de recubrimientos usadas con BAL

BAL/metabolitos	Matriz polimérica	Producto objetivo	Patógeno inhibido	Ventajas	Limitaciones	Referencia
<i>L. plantarum</i> <i>L. pentosus</i> (biosurfactantes)	Alginato	Fresas	<i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> <i>Pseudomonas aeruginosa</i> <i>A. niger</i> <i>R. stolonifer</i>	Redujo hongos (<i>A. niger</i> , <i>R. stolonifer</i>) en un 29.76 ± 3.25 % y bacterias (<i>E. coli</i> y <i>S. aureus</i>) en un 31.91 ± 5.06 %	El uso de materiales menos tóxicos para extracción de biosurfactantes. Así como actividades metabólicas afectadas, evaluación de aceptabilidad sensorial y aplicación industrial.	(Rosalinda et al., 2024)
<i>L. paracasei</i> <i>L. rhamnosus</i> <i>L. plantarum</i>	Alginato de sodio	Fresas	<i>E. coli</i> <i>S. aureus</i> <i>R. stolonifer</i>	La descomposición fúngica fue menor (30.0 %, 23.33 % y 31.11 %), que en el control (sin RC y BAL) que fue del 50 %. Asimismo, el color, la dureza, pH y SST se conservaron mejor.	Complementar con estudios de biodigestibilidad <i>in vivo</i> para evaluar funcionalidad probiótica. Asimismo, evaluar aceptación sensorial y aplicación industrial.	(Li et al., 2024)
<i>L. plantarum</i> 299v <i>L. gelidum</i> subsp. <i>Gelidum</i> (I29)	CMC + glicerol	Rodajas de manzana	<i>L. monocytogenes</i>	Se inhibió mejor <i>L. monocytogenes</i> (1.2, 1.9 y 1.8 log UFC/g) que en el control (CMC + glicerol) que fue de 0.3, 0.3 y 0.1. Una diferencia promedio de 1.4 log UFC/g durante 3 días a 4 °C	Evaluar viabilidad económica de <i>L. plantarum</i> 299v. Complementar usando otros parámetros de temperatura de almacenamiento y otros microorganismos patógenos.	(Wong & Li, 2023)

<i>L. plantarum A6</i>	Exopolisacárido de Weissella confusa JCA4	Tomate cherry	<i>Fusarium sp.</i> <i>Rhizopus stolonifer</i>	Menor porcentaje de pérdida de peso (12.19 % y 7.5 %) en comparación con el control que fue de 22.66 % y 11.09 %), inhibición total de <i>Fusarium sp.</i> y <i>Rhizopus stolonifer</i> .	Evaluar aceptabilidad sensorial y aplicación industrial. Investigar requerimientos de <i>L. plantarum A6</i> para inhibición de <i>A. niger</i> y su viabilidad económica.	(Álvarez et al., 2021)
<i>B. subtilis</i> <i>B. tequilensis</i> <i>B. cabrialesii</i>	Alginato	Fresas	<i>B. cinerea</i> <i>A. alternata</i> <i>C. acutatum</i>	La aplicación del alginato más <i>B. subtilis</i> redujo la incidencia y la gravedad de <i>B. cinerea</i> a los 7 días.	Determinar actividad metabólica. Evaluar sensorialmente, además de la aplicación industrial.	(Menéndez-Cañamares et al., 2024)
<i>L. rhamnosus</i> (postbióticos)	Mucílago de semilla de Plantago lanceolata (PLM)	Carne de cordero	<i>PTC</i> <i>(Bacterias psicotróficas)</i> <i>TVC</i> <i>(Bacterias viables totales)</i>	Se obtuvo un 43.46 % menos de TVC y un 48.14 % menos de PTC en comparación con el control (12.5 y 7 log UFC/g). El pH tuvo menor alteración (pH = 5.68) en comparación con el 6.05 del control.	Investigar la aplicación industrial, estudiar su uso en otros tipos de carne.	(Mirzaei et al., 2025)
<i>L. plantarum</i> (postbióticos)	Quitosano	Embutidos	<i>E. coli</i> <i>S. typhimurium</i>	Presentaron un menor aumento de MO (0.05, 0.10, 0.04 log UFC/g) frente al control que fue de (0.87, 0.30, 0.28 log UFC/g) y presentaron menores cambios de humedad (42-45 %) respecto al control (48.2 %).	Complementar con estudios de aceptabilidad, optimizar métodos de producción, aplicación en otros productos cárnicos.	(Zeraat pisheh et al., 2025)
<i>L. paracasei</i> (postbióticos)	Glicerol +Almidón +Gelatina	Tomate	<i>S. typhi</i> <i>B. cereus</i>	Los recubrimientos con sobrenadante de <i>L. paracasei</i>	Evaluar aceptabilidad sensorial, así como también la viabilidad económica de la	(Khalil et al., 2020)

			<i>S. aureus</i>	irradiado y no irradiado presentaron menor porcentaje pérdida de peso (2.05, 1.69 y 2.29, 2.32 %) en comparación con el control (2.71, 2.68 %) y un menor porcentaje de descomposición (40.97, 36.61 y 62.50, 44.25) en comparación con el control (72.74, 56.92) a los 14 días en dos periodos (2017 y 2018).	aplicación de la radiación a escala industrial, evaluar funcionalidad probiótica in vivo. Considerar viabilidad en otras matrices alimentarias y en diferentes condiciones de almacenamiento	
<i>L. lactis</i> <i>L. garvieae</i>	Alginato + maltodextrina + glicerol	Queso fresco	<i>L. Monocytogenes</i>	Los RC con <i>L. lactis</i> y <i>L. garvieae</i> mostraron una reducción significativa de 1.2 - 1.3 unidades logarítmicas a los 8 y 10 días de almacenamiento a 4°C	Complementar con evaluación sensorial, aplicación a escala industrial. Evaluar cómo afecta la eficiencia del RC en evitar oxidación lipídica. Evaluar viabilidad en diferentes condiciones de almacenamiento y tiempos más prolongados	(Silva et al., 2022)

<p><i>L. plantarum</i> 299v (postbióticos)</p>	<p>Alginato de sodio</p>	<p>Filetes de salmón</p>	<p><i>L. Monocytogenes</i> <i>Pseudomonas</i> spp.</p>	<p>Redujo <i>L. Monocytogenes</i> de 3.98 ± 0.05 a 3.48 ± 0.14 log UFC/g en 9 días de almacenamiento. Mostró un efecto bacteriostático en PTC y <i>Pseudomonas</i> spp. (3 a 4 log UFC/g) que a su vez permitió que los compuestos nitrogenados (PUT, CAD, HIS, TYR) se mantuvieran en niveles bajos (0-10 mg/kg), hasta los 6 días de almacenamiento.</p>	<p>Complementar con estudios de digestibilidad <i>in vivo</i>, así mismo su aceptabilidad sensorial, y al tratarse de postbióticos evaluar su viabilidad económica a escala industrial.</p>	<p>(Hua et al., 2022)</p>
--	--------------------------	--------------------------	---	--	---	---------------------------

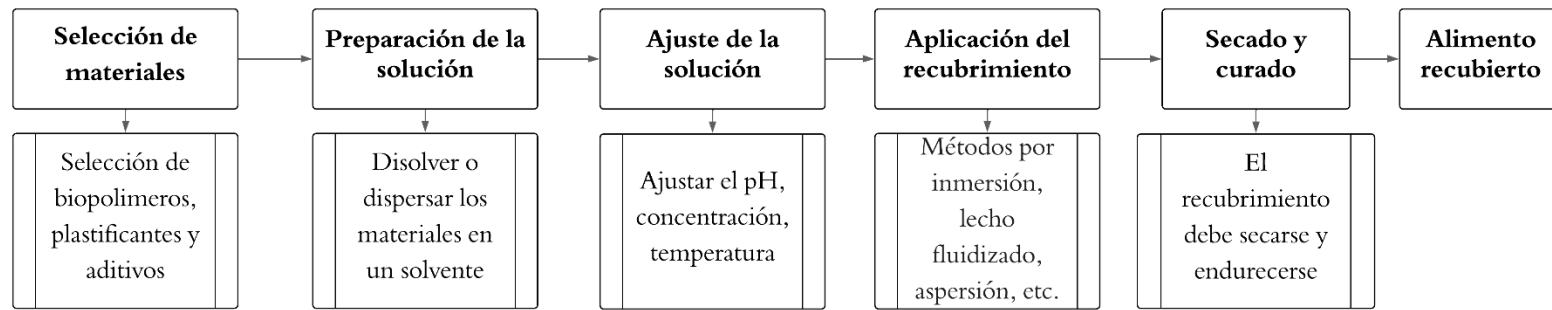


Figura 3. Diagrama esquemático que ilustra el proceso de preparación de recubrimientos comestibles. Adaptado de Jurić et al., (2024).

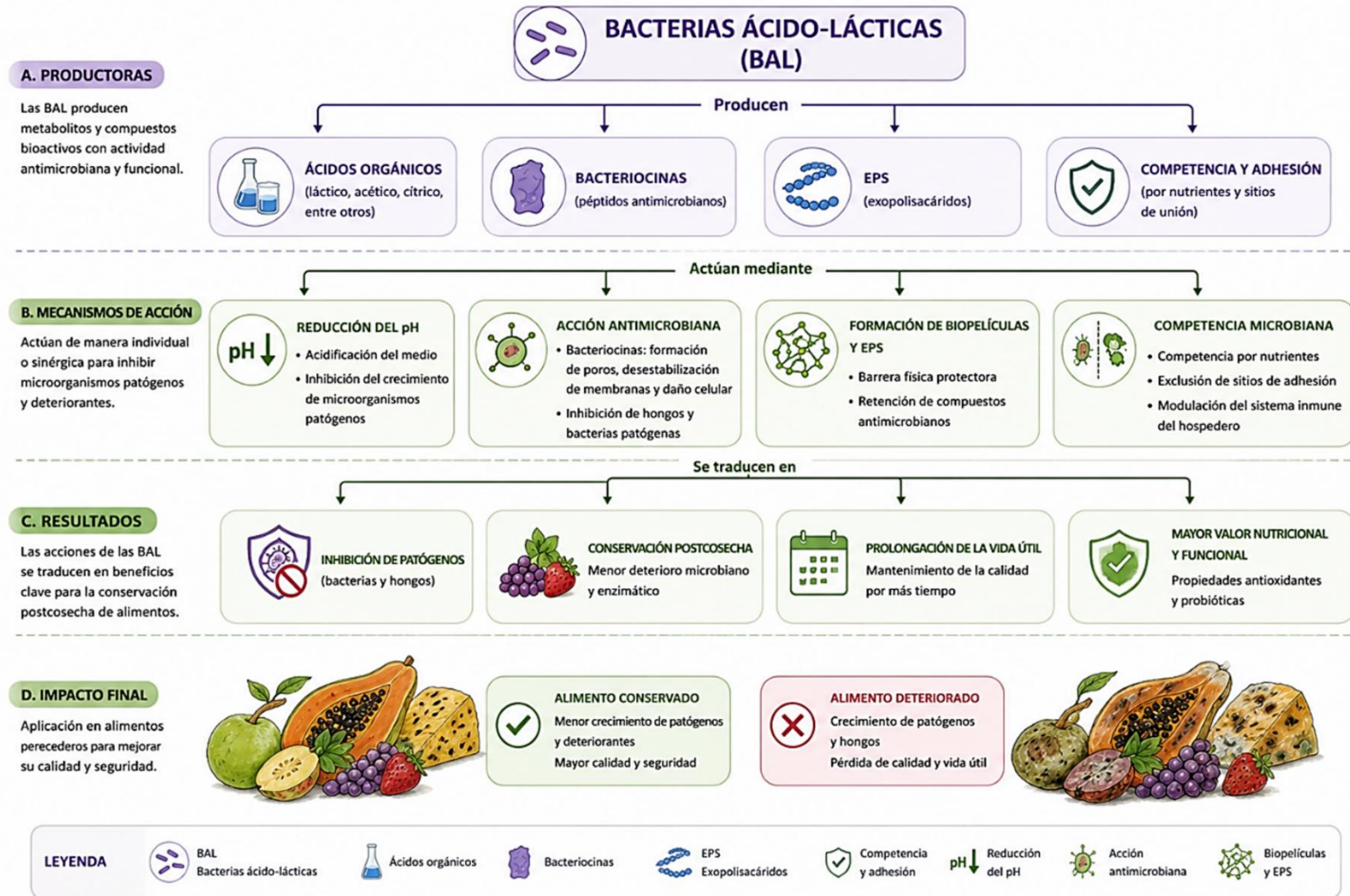


Figura 4. Diagrama de los mecanismos antimicrobianos de las bacterias ácido-lácticas (BAL). Adaptado de Rada-Anillo (2023). Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

A partir de la revisión realizada, se concluye que las bacterias ácido lácticas (BAL) representan una alternativa prometedora para el desarrollo de recubrimientos comestibles (RC), ya sea mediante su incorporación directa o a través de sus metabolitos, como biosurfactantes y postbióticos. Su aplicación en diferentes matrices alimentarias ha demostrado contribuir a la conservación de la calidad microbiológica, fisicoquímica y sensorial de productos hortofrutícolas, cárnicos y fermentados, debido principalmente a sus propiedades antimicrobianas, antioxidantes y probióticas.

Asimismo, diversos estudios han señalado el potencial de las BAL para conferir funcionalidad adicional a los RC, particularmente por sus posibles beneficios sobre la salud gastrointestinal. No obstante, la mayoría de estas evidencias provienen de estudios in vitro, por lo que resulta necesario desarrollar investigaciones in vivo que permitan validar su efecto fisiológico real y su estabilidad durante la digestión.

A pesar de los resultados favorables reportados, persisten limitaciones importantes para su aplicación industrial. Gran parte de las investigaciones analizadas se han realizado a escala de laboratorio y bajo condiciones controladas, lo que limita la extrapolación de los resultados a sistemas de producción reales. En este sentido, futuras investigaciones deberían enfocarse en el escalamiento industrial de los RC con BAL, considerando aspectos relacionados con la estabilidad durante el almacenamiento, la viabilidad técnica y económica, así como la aceptación sensorial y comercial de los productos desarrollados. Por ello, este campo continúa representando un área de investigación con amplio potencial de desarrollo.

REFERENCIAS

Akpogheli, P. O., Edo, G. I., Ali, A. B. M., Yousif, E., Zainulabdeen, K., Owhero, J. O., Isoje, E. F., Igbuku, U. A., Essaghah, A. E. A., Makia, R. S., Ahmed, D. S., Umar, H., & Alamiery, A. A. (2025). Lactic acid bacteria: Nature, characterization, mode of action, products and applications. *Process Biochemistry*, 152, 1–28. <https://doi.org/10.1016/J.PROCBIO.2025.02.010>

Alegre Vilas, I., Abadias Seró, M., Colás Medà, P., Collazo Cordero, C., & Viñas Almenar, I. (2020). Bioconservación frente a patógenos de transmisión alimentaria en frutas y hortalizas mínimamente procesadas. *Arbor*, 196(795), a543. <https://doi.org/10.3989/arbor.2020.795n1007>

Álvarez, A., Manjarres, J. J., Ramírez, C., & Bolívar, G. (2021). Use of an exopolysaccharide-based edible coating and lactic acid bacteria with antifungal activity to preserve the post-harvest quality of cherry tomato. *LWT*, 151. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112225>

Anaya, L. M., Pérez Larios, A., Ruvalcaba Gómez, J. M., Sánchez Burgos, J. A., Romero Toledo, R., & Montalvo González, E. (2020). Funcionalización de los recubrimientos a base de quitosano para la conservación postcosecha de frutas y hortalizas. *TIP Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 23. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2020.0.241>

Bautista, A. G., & Barrado, A. G. (2023). Bacteriocinas como bioconservador alimentario: características generales y aplicación en alimentos. *PubSaúde*, 12, 1–9. <https://doi.org/10.31533/pubsau12.a366>

Belleghia, L., Ferrocino, I., Rita Corvaglia, M., Cesaro, C., Milanović, V., Cardinali, F., Garofalo, C., Coccolin, L., Aquilanti, L., & Osimani, A. (2022). Profiling of autochthonous microbiota and characterization of the dominant lactic acid bacteria occurring in fermented fish sausages. *Food Research International*, 154, 110990. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.110990>

Brayan Daniel Bejar Caceres. (2024). Desarrollo y evaluación de un prototipo para el monitoreo en tiempo real del crecimiento de cultivos biológicos en biorreactores industriales. *UNIVERSIDAD NACIONAL DE*

- COLOMBIA.
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/87964/602185.2024.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Caiza, C. (2023). Avances y perspectivas en la tecnología de recubrimientos comestibles de alimentos: una revisión de su aplicación en la industria alimentaria. <https://doi.org/https://doi.org/10.47187/tvby sk29>
- Chen, H., Su, J., Brennan, C. S., Van der Meeren, P., Zhang, N., Tong, Y., & Wang, P. (2022). Recent developments of electrospun zein nanofibres: Strategies, fabrication and therapeutic applications. *Materials Today Advances*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2022.100307>
- Chen, W., Xie, C., He, Q., Sun, J., & Bai, W. (2023). Improvement in color expression and antioxidant activity of strawberry juice fermented with lactic acid bacteria: A phenolic-based research. *Food Chemistry: X*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100535>
- Costa, M. J., Maciel, L. C., Teixeira, J. A., Vicente, A. A., & Cerqueira, M. A. (2018). Use of edible films and coatings in cheese preservation: Opportunities and challenges. *Food Research International*, 107, 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.02.013>
- D. Hidalgo, J. M. M.-M. (2020). El Desperdicio De Alimentos, Un Problema Global. *IndustriAmbiente*. https://www.industriambiente.com/media/uploads/noticias/documentos/AT_Desperdicios_alimentarios.pdf
- Darbandi, A., Asadi, A., Mahdizade Ari, M., Ohadi, E., Talebi, M., Halaj Zadeh, M., Darb Emamie, A., Ghanavati, R., & Kakanj, M. (2022). Bacteriocins: Properties and potential use as antimicrobials. *Journal of Clinical Laboratory Analysis*, 36(1). <https://doi.org/10.1002/jcla.24093>
- El-Sayed, H. S., El-Sayed, S. M., Mabrouk, A. M. M., Nawwar, G. A., & Youssef, A. M. (2021). Development of Eco-friendly Probiotic Edible Coatings Based on Chitosan, Alginate and Carboxymethyl Cellulose for Improving the Shelf Life of UF Soft Cheese. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(6), 1941–1953. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-02003-3>
- Erazo Solórzano, C., Salazar Daza, D., Vera Chang, J., & Tuárez García, D. (2020). Aplicación De Bacterias Ácido-Lácticas Provenientes Del Mucilago De Cacao Como Agente De Conservación De La Papaya. *Universidad Ciencia y Tecnología*, 24(107), 41–47. <https://doi.org/10.47460/uct.v24i107.412>
- Espitia, P. J. P., Batista, R. A., Azeredo, H. M. C., & Otoni, C. G. (2016). Probiotics and their potential applications in active edible films and coatings for food biopreservation. *Food Research International*, 90, 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.10.013>
- Fan, Y., Ren, J., Xiao, X., Cao, Y., Zou, Y., Qi, B., Luo, X., & Liu, F. (2025). Recent advances in polysaccharide-based edible films/coatings for food preservation: fabrication, characterization, and applications in packaging. *Carbohydrate Polymers*, 364, 123779. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2025.123779>
- Fernández, A., Marín, A., Atarés, L., & Chiralt, A. (2016). Efecto De Recubrimientos Comestibles Con Bacterias Ácido-Lácticas Sobre *Botrytis cinerea* En Uva. <https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/71aea97a-755e-459c-9b84-9cc7e59da6e7/content>
- Formiga, A. S., Pinsetta, J. S., Pereira, E. M., Cordeiro, I. N. F., & Mattiuz, B. H. (2019). Use of edible coatings based on hydroxypropyl methylcellulose and beeswax in the conservation of red guava 'Pedro Sato.' *Food Chemistry*, 290, 144–151. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.49>

142

- Galus, S. (2019). Development of Edible Coatings in the Preservation of Fruits and Vegetables. In *Polymers for Agri-Food Applications* (pp. 377–390). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19416-1_19
- García Tarabay Astrid Saraí. (2017). Diseño De Un Recubrimiento Comestible Antimicrobiano Utilizando Quitosano Y Proteína De Chicharo Entrecruzada. <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/1260>
- Guimarães, A., Abrunhosa, L., Pastrana, L. M., & Cerqueira, M. A. (2018). Edible Films and Coatings as Carriers of Living Microorganisms: A New Strategy Towards Biopreservation and Healthier Foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(3), 594–614. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12345>
- Gutián, M. V., Ibarguren, C., Soria, M. C., Hovanyecz, P., Banchio, C., & Audisio, M. C. (2019). Anti-*Listeria monocytogenes* effect of bacteriocin-incorporated agar edible coatings applied on cheese. *International Dairy Journal*, 97, 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.05.016>
- Hassan, B., Chatha, S. A. S., Hussain, A. I., Zia, K. M., & Akhtar, N. (2018). Recent advances on polysaccharides, lipids and protein based edible films and coatings: A review. In *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 109, pp. 1095–1107). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.11.097>
- Hua, Q., Wong, C. H., & Li, D. (2022). Postbiotics enhance the functionality of a probiotic edible coating for salmon fillets and the probiotic stability during simulated digestion. *Food Packaging and Shelf Life*, 34. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100954>
- Ibrahim, O. O. (2019). Classification of Antimicrobial Peptides Bacteriocins, and the Nature of Some Bacteriocins with Potential Applications in Food Safety and Bio-Pharmaceuticals. <https://ecronicon.net/assets/ecmi/pdf/ECMI-15-00677.pdf>
- Iñiguez-Moreno, M., Santiesteban-Romero, B., Flores-Contreras, E. A., Scott-Ayala, S., Araújo, R. G., Iqbal, H. M. N., Melchor-Martínez, E. M., & Parra-Saldívar, R. (2024). Sustainable Solutions for Post-harvest Berry Protection: Natural Edible Coatings. *Food and Bioprocess Technology*, 17(11), 3483–3505. <https://doi.org/10.1007/s11947-023-03301-z>
- Jurić, M., Maslov Bandić, L., Carullo, D., & Jurić, S. (2024). Technological advancements in edible coatings: Emerging trends and applications in sustainable food preservation. *Food Bioscience*, 58, 103835. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103835>
- Khalfallah, R., Mechmeche, M., Ksontini, H., Jmoui, I., Hamdi, M., & Kachouri, F. (2024). Novel Approach Coating by Edible Biopolymers of Sesame Fermented with *Lactobacillus plantarum* to Improve the Shelf Life of Strawberries and Preserve Their Nutritional Quality During Storage. *Journal of Packaging Technology and Research*, 8(1), 63–77. <https://doi.org/10.1007/s41783-024-00162-5>
- Khalil, O. A. A., Mounir, A. M., & Hassanien, R. A. (2020). Effect of gamma irradiated *Lactobacillus* bacteria as an edible coating on enhancing the storage of tomato under cold storage conditions. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 13(1), 318–330. <https://doi.org/10.1080/16878507.2020.1723886>
- Khodaei, D., & Hamidi, Z. (2019). Influence of bioactive edible coatings loaded with *Lactobacillus plantarum* on physicochemical properties of fresh strawberries. *Post-harvest Biology and Technology*, 156. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.1>

50

- 10944
- Kumar, A. (2024). Recent advancements in polysaccharides, proteins and lipids based edible coatings to enhance guava fruit shelf-life: A review. In *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 262). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129826>
- Li, N., Cheng, Y., Li, Z., Yue, T., & Yuan, Y. (2024). An alginate-based edible coating containing lactic acid bacteria extends the shelf life of fresh strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.). *International Journal of Biological Macromolecules*, 274. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133273>
- Liang, Q., Zhou, W., Peng, S., Liang, Z., Liu, Z., Zhu, C., & Mou, H. (2025). Current status and potential of bacteriocin-producing lactic acid bacteria applied in the food industry. *Current Research in Food Science*, 10, 100997. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2025.100997>
- Lida María Rada Anillo. (2023). Capacidad Bioconservante de Bacterias Ácido Lácticas y/o Metabolitos en Productos Pesqueros y sus Derivados. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/60072>
- Lieu, D. M., Dang, T. T. K., & Nguyen, H. T. (2025). Protein and polysaccharide edible coatings: A promising approach for fruits preservation - recent advances. In *Food Chemistry: X* (Vol. 27). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102388>
- López, A., & Aldana, A. (2019). Edible coatings based on sodium alginate and ascorbic acid for application on fresh-cut pineapple (*Ananas comosus* (L.) Merr.). *Agronomía Colombiana*, 37(3), 233–238. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v37n3.76173>
- López-Mendoza, J., Adriano-Anaya, L., Gálvez-López, D., & Vázquez-Ovando, A. (2023). Compuestos bioactivos en quesos: biosíntesis, actividad biológica y contribución de las bacterias ácido-lácticas. *Agronomía Mesoamericana*. <https://doi.org/10.15517/am.v34i2.51432>
- Manjarres Melo, J. J., Álvarez, A., Ramirez, C., & Bolívar, G. (2021). Antagonistic Activity of Lactic Acid Bacteria Against Phytopathogenic Fungi Isolated from Cherry Tomato (*Solanum lycopersicum* var. *cerasiforme*). *Current Microbiology*, 78(4), 1399–1408. <https://doi.org/10.1007/s00284-021-02416-w>
- Menéndez-Cañamares, S., Blázquez, A., Albertos, I., Poveda, J., & Díez-Méndez, A. (2024). Probiotic *Bacillus subtilis* SB8 and edible coatings for sustainable fungal disease management in strawberry. *Biological Control*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2024.105572>
- Miteluț, A. C., Popa, E. E., Drăghici, M. C., Popescu, P. A., Popa, V. I., Bujor, O.-C., Ion, V. A., & Popa, M. E. (2021). Latest Developments in Edible Coatings on Minimally Processed Fruits and Vegetables: A Review. *Foods*, 10(11), 2821. <https://doi.org/10.3390/foods10112821>
- Moghadas, H. C., Smith, J. S., & Tahergorabi, R. (2024). Recent Advances in the Application of Edible Coatings for Shelf-Life Extension of Strawberries: A Review. In *Food and Bioprocess Technology*. Springer. <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03517-7>
- Odila Pereira, J., Soares, J., J.P. Monteiro, M., Gomes, A., & Pintado, M. (2018). Impact of whey protein coating incorporated with *Bifidobacterium* and *Lactobacillus* on sliced ham properties. *Meat Science*, 139, 125–133. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.01.016>
- Panahirad, S., Dadpour, M., Peighambaroust, S. H., Soltanzadeh, M., Gullón, B., Alirezalu, K., & Lorenzo, J. M. (2021). Applications of carboxymethyl cellulose- and pectin-based active edible coatings in preservation of fruits

- and vegetables: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 110, 663–673. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2021.02.025>
- Pang, X., Song, X., Chen, M., Tian, S., Lu, Z., Sun, J., Li, X., Lu, Y., & Yuk, H. (2022). Combating biofilms of foodborne pathogens with bacteriocins by lactic acid bacteria in the food industry. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(2), 1657–1676. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12922>
- Payal, A., Sandeep, G. D. S., Bammidi, M., Narayandas, A., Syed, I., & Rao, M. V. (2025). Recent advances in plant protein-based edible coatings for shelf-life enhancement of perishable and high nutritive value foods – A Review. In *Food Packaging and Shelf Life* (Vol. 48). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2025.101465>
- Peng, Z., Xiong, T., Huang, T., Xu, X., Fan, P., Qiao, B., & Xie, M. (2023). Factors affecting production and effectiveness, performance improvement and mechanisms of action of bacteriocins as food preservative. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(33), 12294–12307. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2100874>
- Pereira, R. N., Vicente, A. A., & da Silva, M. A. (2022). Probiotic edible films and coatings: Applications and challenges. *Food Engineering Reviews*, 14(2), 321–340. <https://doi.org/10.1007/s12393-021-09289-7>
- Plaza-Díaz, J., Ruiz-Ojeda, F. J., Gil-Campos, M., & Gil, A. (2019). Mechanisms of Action of Probiotics. *Advances in Nutrition*, 10, S49–S66. <https://doi.org/10.1093/advances/nmy063>
- Racioppo, A., Campaniello, D., Sinigaglia, M., Bevilacqua, A., Speranza, B., & Corbo, M. R. (2022). Use of Food Spoilage and Safety Predictor for an "A Priori" Modeling of the Growth of Lactic Acid Bacteria in Fermented Smoked Fish Products. *Foods*, 11(7), 946. <https://doi.org/10.3390/foods11070946>
- Rondón, A. J., Rodríguez, M., & Beruvides, G. A. (2020). Probiotic potential of *Lactobacillus salivarius* in animals of zootechnical interest. *Potencial probiótico de Lactobacillus salivarius en animales de interés zootécnico*. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 54(2). <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2025.100997>
- Rosalinda, K., Fitriyanti, M., & Purwasena, I. A. (2024). Production and characterization of biosurfactants from lactic acid bacteria in Dadiah for strawberries edible coating. *Food Bioscience*, 62, 105386. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.105386>
- Sapna, Sharma, C., Pathak, P., Yadav, S. P., & Gautam, S. (2024). Potential of emerging "all-natural" edible coatings to prevent post-harvest losses of vegetables and fruits for sustainable agriculture. *Progress in Organic Coatings*, 193, 108537. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2024.108537>
- Sharma, M., Bains, A., Goksen, G., Ali, N., Khan, M. R., Karabulut, G., & Chawla, P. (2024). Optimization of ultrasonication assisted extraction of Aegle marmelos fruit shell nano polysaccharide and evaluation of photocatalytic dye reduction and edible coating for fresh-cut fruits. *Food Chemistry: X*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101895>
- Silva, S. P. M., Ribeiro, S. C., Teixeira, J. A., & Silva, C. C. G. (2022). Application of an alginate-based edible coating with bacteriocin-producing *Lactococcus* strains in fresh cheese preservation. *LWT*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112486>
- Silva, S. P. M., Teixeira, J. A., & Silva, C. C. G. (2023). Recent advances in the use of edible films and coatings with probiotic and bacteriocin-producing lactic acid bacteria. In *Food Bioscience* (Vol. 56). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103196>
- Speranza, B., Racioppo, A., Beneduce, L., Bevilacqua, A., Sinigaglia, M., & Corbo, M. R. (2017). Autochthonous lactic acid bacteria

- with probiotic aptitudes as starter cultures for fish-based products. *Food Microbiology*, 65, 244–253.
<https://doi.org/10.1016/j.fm.2017.03.010>
- Suhag, R., Kumar, N., Petkoska, A. T., & Upadhyay, A. (2020). Film formation and deposition methods of edible coating on food products: A review. *Food Research International*, 136, 109582.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109582>
- Sun, J., Liu, C., Duan, J., Liu, J., Dong, X., Zhang, Y., Wang, N., Wang, J., & Hou, B. (2022). Facile fabrication of self-healing silicone-based poly(urea-thiourea)/tannic acid composite for anti-biofouling. *Journal of Materials Science & Technology*, 124, 1–13.
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.01.026>
- Teber, R., & Asakawa, S. (2024). In Silico Screening of Bacteriocin Gene Clusters within a Set of Marine Bacillota Genomes. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(5), 2566.
<https://doi.org/10.3390/ijms25052566>
- Torres-García, J. R., Leonardo-Elias, A., Angoa-Pérez, M. V., Villar-Luna, E., Arias-Martínez, S., Oyoque-Salcedo, G., & Oregel-Zamudio, E. (2024). *Bacillus subtilis* Edible Films for Strawberry Preservation: Antifungal Efficacy and Quality at Varied Temperatures. *Foods*, 13(7).
<https://doi.org/10.3390/foods13070980>
- Usman, I., Sana, S., Jaffar, H. M., Munir, M., Afzal, A., Sukhera, S., Boateng, I. D., Afzaal, M., & Urugo, M. M. (2025). Recent progress in edible films and coatings: Toward green and sustainable food packaging technologies. *Applied Food Research*, 5(2), 101070.
<https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101070>
- Wong, C. H., & Li, D. (2023). Comparison of two strategies enhancing the antagonistic effect of lactic acid bacteria in edible coating against *Listeria monocytogenes* on fresh-cut apple slices. *LWT*, 182, 114923.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114923>
- Xu, Y., Li, Y., Bao, T., Zheng, X., Chen, W., & Wang, J. (2020). A review on edible coatings and films with probiotics for food preservation and health benefits. *Foods*, 9(10), 1–21.
<https://doi.org/10.3390/foods9101341>
- Yıldırım-Yalçın, M., Şeker, M., & Sadıkoğlu, H. (2022). Effect of grape derivatives and cross-linked maize starch coatings on the storage life of strawberry fruit. *Progress in Organic Coatings*, 167, 106850.
<https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.106850>