

Bacteriocinas: características, mecanismos de acción y aplicaciones biotecnológicas

Bacteriocins: characteristics, mechanisms of action, and biotechnological applications

Paola A. Granillo-Delgadillo ^a, Jesús A. Trejo-Hernández ^a, Luisa García-Vázquez ^a, Gabriela Medina-Pérez ^a, Armando Zepeda-Bastida ^a, Arisbet Ortiz-Ortiz ^{a*}

Abstract:

Bacteriocins are peptides with antimicrobial activity synthesized by lactic acid bacteria as part of their metabolic processes. In recent years, these molecules have gained relevance due to their potential application as natural compounds for food preservation. Therefore, this work aims to review and analyze the most relevant aspects of bacteriocins, including their general characteristics, mechanisms of action, classification criteria, methodologies for detection and quantification, and their main applications in the biotechnological field. Bacteriocins exhibit antimicrobial activity against various pathogenic microorganisms associated with public health concerns, such as *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, and *Salmonella* spp. Their mechanism of action typically involves forming pores in the cytoplasmic membrane of target bacteria, leading to the leakage of intracellular components and cell death. Different analytical approaches are used for their detection and quantification, including biological assays, molecular techniques, and immunological methods. In the food industry, bacteriocins have been applied to dairy products, meats, canned foods, and fermented beverages to improve microbial safety and extend shelf life. Because of their antimicrobial efficacy, specificity, and safety profile, bacteriocins are promising biotechnological tools not only for food preservation but also for emerging applications in animal nutrition, probiotic development, and other areas of applied biotechnology.

Keywords:

Bacteriocins, lactic acid bacteria, bio preservation, antimicrobial peptides, food biotechnology

Resumen:

Las bacteriocinas son péptidos con actividad antimicrobiana sintetizados por bacterias ácido lácticas como parte de sus procesos metabólicos. En años recientes, estas moléculas han cobrado relevancia por su potencial de aplicación como compuestos naturales para la conservación de alimentos; en este sentido, el presente trabajo tiene como propósito revisar y analizar los aspectos más relevantes relacionados con las bacteriocinas, incluyendo sus características generales, mecanismos de acción, criterios de clasificación, metodologías empleadas para su detección y cuantificación, así como sus principales aplicaciones en el ámbito biotecnológico. Las bacteriocinas presentan actividad antimicrobiana contra diversos microorganismos patógenos asociados con enfermedades de interés en la salud pública, como *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* y *Salmonella* spp.; su mecanismo de acción suele implicar la formación de poros en la membrana citoplasmática de las bacterias blanco, lo que provoca la fuga de componentes intracelulares y la muerte celular; para su detección y cuantificación se utilizan diferentes enfoques analíticos, como ensayos biológicos, técnicas moleculares y métodos inmunológicos. En la industria alimentaria, las bacteriocinas se han aplicado en productos lácteos, carnes, alimentos enlatados y bebidas fermentadas, para mejorar la seguridad microbiana y prolongar su vida útil. Debido a su eficacia antimicrobiana, especificidad y perfil de seguridad, las bacteriocinas representan herramientas biotecnológicas prometedoras no solo para la conservación de alimentos, sino también para aplicaciones emergentes en nutrición animal, en el desarrollo de probióticos y en otras áreas de biotecnología aplicada.

Palabras Clave:

Bacteriocinas, bacterias lácticas, bioconservación, péptidos antimicrobianos, biotecnología alimentaria

1. Introducción

Las bacteriocinas son compuestos producidos como resultado del metabolismo secundario de ciertas bacterias ácido lácticas; se sintetizan con el propósito de inhibir el desarrollo de otros microorganismos [1]. A pesar de que suelen compararse con los antibióticos, presentan características distintivas: las bacteriocinas se sintetizan de forma ribosomal [2].

Las bacterias productoras cuentan con mecanismos de inmunidad específicos que les confieren protección frente a las bacteriocinas que producen. Estas moléculas son de naturaleza polipeptídica, poseen un peso molecular relativamente elevado, ejercen su actividad mediante mecanismos de acción específicos y presentan un espectro antimicrobiano restringido, dirigido principalmente contra bacterias filogenéticamente cercanas a la cepa productora [3, 4].

^a Universidad Autónoma del estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Agropecuarias | Tulancingo de Bravo, Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0005-3722-9743> gr380083@uaeh.edu.mx, <https://orcid.org/0009-0006-6085-806X> tr463703@uaeh.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0003-4600-7446> ibt.garval@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8673-941X> gabriela_medina@uaeh.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0003-0572-5206> azepeda@uaeh.edu.mx

* Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Agropecuarias | Tulancingo de Bravo, Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0002-7599-6773>, ortizarisbet00@gmail.com

Fecha de recepción: 06/03/2026, Fecha de aceptación: 02/04/2026, Fecha de publicación: 05/09/2026

DOI: <https://doi.org/10.29057/icap.v13iEspecial.17125>



En los últimos años, las bacteriocinas han cobrado una importancia creciente en diversos sectores de la industria alimentaria como estrategia alternativa de biocontrol microbiano. Sus aplicaciones abarcan desde la inhibición de patógenos en alimentos procesados, donde se ha evaluado su incorporación como sustituto parcial o total de conservadores, hasta su uso en alimentos frescos, contribuyendo al control de patógenos y fitopatógenos relevantes en el ámbito agroalimentario [5]. Estas aplicaciones representan una oportunidad para reducir el uso de aditivos sintéticos en los alimentos. Entre sus principales funciones destaca la inhibición de diversos microorganismos patógenos asociados a enfermedades transmitidas por alimentos, como *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* y *Salmonella* spp. [6]. Una de las bacteriocinas más estudiadas y aprobadas por la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) para su uso en productos alimentarios es la nisina, que está clasificada como Generalmente Reconocida como Segura (GRAS) [1].

La producción de bacteriocinas de amplio espectro de actividad antimicrobiana constituye una estrategia importante para el control de la fermentación láctica en productos cárnicos. A diferencia del empleo de cultivos microbianos completos, la incorporación directa de estas moléculas permite reducir posibles modificaciones en las características sensoriales del alimento, particularmente en aspectos como el sabor y la textura, lo cual resulta especialmente relevante en productos no fermentados. Asimismo, durante la elaboración de embutidos se emplean cultivos iniciadores que incluyen cepas productoras de bacteriocinas, lo que permite obtener productos más homogéneos y de mayor calidad, además de mejorar el control de los microorganismos patógenos. En este contexto, la bioconversión basada en bacteriocinas se perfila como una alternativa prometedora para la industria alimentaria, ya que contribuye a la producción de alimentos más seguros, con mayor estabilidad durante el almacenamiento y menor dependencia de conservadores sintéticos, lo que favorece tanto a productores como a consumidores. Adicionalmente, se han desarrollado formulaciones a base de bacteriocinas destinadas a la desinfección de utensilios y superficies en instalaciones de

procesamiento de alimentos [7].

2. Clasificación de las bacteriocinas

Las bacteriocinas pueden agruparse en distintas categorías según sus características estructurales, su peso molecular y su mecanismo de acción.

Lantibióticos

Los lantibióticos se dividen en dos clases principales, considerando su estructura y el modo en que interactúan con los microorganismos sensibles:

Clase A. Corresponde a péptidos de conformación alargada, generalmente helicoidales, que presentan propiedades anfipáticas. Su actividad antimicrobiana se basa en la despolarización de la membrana celular, lo que conduce a la destrucción de la célula diana. La nisina es el ejemplo más representativo de este grupo.

Clase B. Incluye péptidos de estructura globular e hidrofóbica, con un peso molecular aproximado de 1.8 a 2.1 kDa. Estas bacteriocinas presentan una carga neta negativa o son eléctricamente neutras, y su acción antimicrobiana se asocia principalmente a la inhibición de enzimas esenciales. Entre los ejemplos más destacados se encuentran las duramicinas A, B y C, así como la cinamisina [1, 8].

Bacteriocinas no lantibióticas

Las bacteriocinas no lantibióticas están constituidas por péptidos de entre 30 y 60 aminoácidos, con un peso molecular inferior a 10 kDa. Se caracterizan por no contener aminoácidos modificados y por presentar estabilidad frente a variaciones de temperatura y de pH. Este grupo representa el subgrupo más amplio de bacteriocinas producidas por bacterias ácido-lácticas, tanto por el número de compuestos identificados como por su actividad antimicrobiana y su potencial de aplicación. Las bacteriocinas no lantibióticas se subdividen en tres clases:

Clase A. Este grupo se caracteriza por su elevada actividad antimicrobiana, en particular frente a las bacterias del género *Listeria*. Hasta la fecha, se han descrito únicamente tres bacteriocinas representativas de esta categoría: pediocina PA-1, enterocina A y divercina V41.

Clase B. Incluye bacteriocinas compuestas por dos péptidos cuya actividad antimicrobiana requiere la presencia conjunta de ambos componentes en proporciones similares. Su modo de acción se relaciona principalmente con la formación de poros en la

membrana celular de las bacterias sensibles. Entre los ejemplos más representativos de este grupo se encuentra la sakacina.

Clase C. Presentan una estructura cíclica originada por la unión covalente entre los extremos amino y carboxilo terminales; son termoestables y no experimentan modificaciones postraduccionales. La enterocina AS-48, producida por *Enterococcus faecalis*, es el ejemplo más representativo de esta clase [1, 9, 10].

Bacteriocinas termolábiles

Este grupo, conocido como bacteriolisinas, incluye péptidos con un peso molecular superior a 30 kDa que se caracterizan por su sensibilidad al calor; su mecanismo de acción se basa en la catálisis y la posterior hidrólisis de la pared celular de bacterias susceptibles. Entre las bacteriolisinas más estudiadas se encuentran la helveticina J, producida por *Lactobacillus helveticus*, y la enterocina, sintetizada por *Enterococcus faecium* [1, 10].

3. Producción de bacteriocinas

La producción de bacteriocinas está estrechamente relacionada con el crecimiento y la actividad metabólica de la cepa productora. Entre los principales factores que influyen en este proceso se encuentran la temperatura, el pH, la composición del medio de cultivo y la presencia de compuestos inductores. La temperatura desempeña un papel determinante en la síntesis de bacteriocinas, y se han reportado rangos de incubación de 20 a 50 °C. No obstante, diversos estudios han demostrado que la producción puede llevarse a cabo incluso a temperaturas distintas de las óptimas para el crecimiento celular [11, 12].

En relación con el pH, este suele mantenerse relativamente constante durante la producción de bacteriocinas, ya sea mediante la neutralización de los ácidos generados durante la fermentación con soluciones tampón en el medio o mediante la adición continua de una base. El control del pH se ha demostrado como un factor clave que influye en la estabilidad, la solubilidad y la adsorción de las bacteriocinas, tanto en la membrana citoplasmática como en la superficie de los sistemas de cultivo [13, 14].

La composición del medio de cultivo, en particular el tipo y la concentración de las fuentes de carbono y de nitrógeno, influye significativamente en la producción de bacteriocinas. Diversas investigaciones han señalado que la glucosa es una fuente de carbono más eficiente que la sacarosa o la fructosa para la síntesis de bacteriocinas como la nisina y la pediocina AcH. En cuanto a las fuentes de nitrógeno, se ha observado que el incremento de la concentración de componentes no definidos, como extracto de levadura, extracto de carne o peptonas, favorece un aumento de la producción de estas moléculas [15, 16].

El oxígeno también constituye un factor relevante que puede modificar los rendimientos de las bacteriocinas. En el caso de la nisina, la presencia de oxígeno puede activar diferentes rutas metabólicas que afectan su producción; algunos estudios sugieren condiciones anaerobias, mientras que otros recomiendan el uso de atmósferas enriquecidas con oxígeno. Asimismo, la eficiencia con la que las bacteriocinas se liberan al medio de cultivo puede influir en su producción, por lo que se ha propuesto incorporar surfactantes como estrategia para mejorar dicho proceso [13, 17].

4. Mecanismos de acción

La actividad de las bacteriocinas está influida por diversos factores, entre los que se incluyen la composición de la membrana citoplasmática, la estructura y el nivel de expresión de proteínas asociadas a la inmunidad bacteriana, así como las características fisicoquímicas del medio. Recientemente, se ha identificado la participación de moléculas localizadas en la superficie de la membrana celular que favorecen la interacción y la unión de la bacteriocina producida con otras bacterias [18, 19].

La mayoría de las bacteriocinas sintetizadas por las bacterias ácido-lácticas ejercen su efecto inhibitorio mediante la formación de poros en la membrana celular de la bacteria diana. Este mecanismo se inicia con la atracción de las bacteriocinas hacia la célula diana mediante interacciones electrostáticas, ya que estas moléculas presentan carga positiva y se asocian con los fosfolípidos de carga negativa de la membrana bacteriana. La unión inicial ocurre cuando la región N-terminal, de carácter hidrofílico,

Interactúa con la superficie polar de la membrana; posteriormente, la región C-terminal, hidrofóbica, se inserta en la zona apolar de la membrana, lo que conduce a la formación de poros. Como consecuencia, se produce la pérdida de iones de potasio, de ATP y, en algunos casos, de aminoácidos y de otras moléculas de bajo peso molecular. Este fenómeno provoca la disminución del potencial de membrana y el agotamiento energético celular, interfiriendo con la síntesis de ADN, ARN y proteínas, lo que finalmente conduce a la muerte de la célula bacteriana [20, 21].

Las bacterias productoras de bacteriocinas evitan los efectos tóxicos de estos compuestos mediante la expresión de proteínas de inmunidad específicas, que suelen estar codificadas en el mismo operón que la bacteriocina. Este sistema se rige por mecanismos de transducción de señales de dos componentes, lo que permite a la bacteria mantener su viabilidad, continuar su multiplicación y liberar de forma constante compuestos bioconservadores en el alimento. Este proceso contribuye a la estabilidad del producto y favorece la prolongación de su vida útil [22, 23].

5. Resistencia bacteriana

La resistencia frente a las bacteriocinas puede presentarse de manera natural o intrínseca, o bien desarrollarse tras una exposición prolongada, fenómeno conocido como resistencia adquirida. Este tipo de resistencia suele asociarse a modificaciones en la pared y la membrana celulares, que incluyen cambios en el potencial eléctrico, la fluidez, la composición y la carga de los lípidos de la membrana, así como variaciones en el grosor de la pared celular. Estos mecanismos han sido ampliamente estudiados en especies como *Listeria monocytogenes*, *Listeria innocua*, *Streptococcus pneumoniae* y *Streptococcus bovis*, en las cuales la resistencia se vincula principalmente con alteraciones estructurales en la pared y la membrana celular, dichas modificaciones incluyen cambios en la composición de los ácidos grasos de la membrana y una reducción en el contenido de fosfolípidos, lo que limita la formación de poros y disminuye la eficacia de las bacteriocinas [6,24–26].

6. Técnicas de identificación y cuantificación

Existen diversas metodologías para la identificación, detección y cuantificación de bacteriocinas, que pueden agruparse principalmente en tres categorías: técnicas biológicas, genéticas e inmunológicas.

Pruebas biológicas

Las pruebas biológicas suelen constituir la fase inicial para identificar bacterias con potencial para producir bacteriocinas. Entre las metodologías más empleadas para evaluar la producción de bacteriocinas se encuentran los ensayos de difusión en agar y las pruebas turbidimétricas. Estas técnicas se basan en la capacidad de los compuestos antimicrobianos para inhibir el crecimiento de un microorganismo indicador previamente inoculado, ya sea en placas de agar o en sistemas de microplacas. En el caso de los ensayos de difusión en agar, la actividad antimicrobiana suele expresarse en unidades arbitrarias (UA), mientras que en los métodos turbidimétricos se reporta como unidades de bacteriocina (UB); ambas medidas corresponden al inverso de la mayor dilución de la muestra que es capaz de impedir el crecimiento del microorganismo indicador en agar, o bien de disminuir aproximadamente en un 50% su desarrollo en placas de micro titulación, aunque estos procedimientos son relativamente simples, sensibles y de uso frecuente en estudios microbiológicos, presentan algunas limitaciones asociadas con la reproducibilidad y la precisión de los resultados; asimismo, la estimación de la actividad antimicrobiana puede verse influida por la sensibilidad de la cepa indicadora empleada y carece de especificidad, ya que estos métodos no permiten diferenciar entre bacteriocinas y otros compuestos con actividad antimicrobiana [18, 27, 28].

Pruebas genéticas

Las técnicas de análisis genético, como la reacción en cadena de la polimerasa (PCR) y la hibridación ADN-ADN mediante Southern blot, se emplean con frecuencia para determinar si una bacteria posee los genes necesarios para la síntesis de una bacteriocina específica; estos métodos se caracterizan por su elevada sensibilidad y precisión, lo que permite identificar la presencia del gen estructural asociado a bacteriocinas previamente descritas en diferentes cepas bacterianas. No obstante, la detección de dicho gen en el microorganismo no garantiza que se exprese

Activamente ni permite determinar la cantidad de bacteriocina que puede producirse [18, 29, 30].

Pruebas inmunológicas

Las técnicas inmunológicas son herramientas eficaces para la detección y cuantificación de bacteriocinas; en general, estos métodos se basan en la inmovilización del antígeno sobre una superficie inerte, donde puede ser reconocido por un anticuerpo específico; la formación del complejo antígeno-anticuerpo se detecta posteriormente mediante una reacción enzimática. Los ensayos inmunoenzimáticos constituyen herramientas útiles para la detección y cuantificación de bacteriocinas en diferentes tipos de muestras, tales como sobrenadantes de cultivos de microorganismos productores o matrices alimentarias en las que estos compuestos puedan estar presentes. De acuerdo con la naturaleza de la muestra utilizada para la identificación del antígeno, estas metodologías pueden agruparse en dos categorías principales: 1) comprende aquellas técnicas que requieren la transferencia de células seguida de su reconocimiento mediante anticuerpos específicos, como ocurre en el método conocido como “colony immunoblotting” y 2) basada en ensayos de transferencia de bacteriocinas semi-purificadas, dentro de los cuales se incluyen diversas metodologías según el tipo de transferencia y la superficie utilizada para la fijación del antígeno, tales como:

I. Western blotting: basado en la transferencia electroforética de bacteriocinas a una membrana de nitrocelulosa.

II. Spot immunoblotting: consiste en la aplicación directa de las bacteriocinas sobre una membrana de nitrocelulosa.

III. ELISA: realizado mediante la fijación directa del antígeno en placas de poliestireno.

Hasta la fecha, las técnicas inmunológicas más empleadas son las que permiten la detección y la cuantificación directas de las bacteriocinas [18, 31].

7. Bacteriocinas representativas

Entre las bacteriocinas más estudiadas y utilizadas se encuentran las siguientes:

Nisina

La nisina fue descrita por primera vez en 1928 y constituye la primera bacteriocina aislada de *Lactococcus lactis*. En la actualidad, es una de las bacteriocinas más estudiadas y caracterizadas, y su uso se ha extendido ampliamente como agente conservador en la industria alimentaria; además, es la única bacteriocina que ha recibido la aprobación de la FDA, lo que permite su aplicación en diversos productos alimentarios. Se produce de manera natural en ciertos productos lácteos y se utiliza como aditivo para prevenir el deterioro causado por bacterias Gram positivas, principalmente de los géneros *Clostridium*, *Staphylococcus*, *Bacillus* y *Listeria*. Existen dos variantes principales, nisina A y nisina Z, que difieren únicamente en el aminoácido de la posición 27: la histidina presente en la nisina A es sustituida por asparagina en la nisina Z. La biosíntesis de la nisina está regulada por un conjunto de genes organizados en los operones nisABTCIP, nisRK y nisFEG, que controlan la expresión del gen estructural *nisA*. El precursor inactivo NisA es sometido a modificaciones postraduccionales por las proteínas NisB y NisC, responsables de la deshidratación de residuos de serina y treonina y de la formación de enlaces tioéter característicos de los lantibióticos [32-35].

Pediocina

La pediocina es una bacteriocina producida por *Pediococcus acidilactici* y se utiliza como conservador en productos vegetales y cárnicos, destacando por su elevada actividad frente a especies del género *Listeria*; debido a esta eficacia, presenta un alto potencial para su aplicación en productos lácteos. Inicialmente, se sintetiza como un pre péptido de 62 aminoácidos que, tras su procesamiento, da lugar a un péptido maduro de 44 residuos. Este péptido es anfipático, posee carga positiva, regiones altamente hidrofóbicas y dos enlaces disulfuro. La estructura terciaria de la pediocina PA-1 ha sido caracterizada, revelando la presencia de tres láminas β en el extremo N-terminal que forman una estructura tipo horquilla, mientras que el extremo C-terminal presenta una elevada flexibilidad conformacional, con excepción del enlace disulfuro entre los aminoácidos 24 y 44, el cual es esencial para su actividad biológica. La síntesis de la pediocina está controlada por un conjunto de genes: *pedA* codifica el péptido estructural, *pedB* está involucrado en la

Inmunidad y *pedC* y *pedD* participan en la secreción del péptido maduro [32, 36-38].

Plantaricinas E/F y J/K

Las plantaricinas son bacteriocinas producidas por *Lactobacillus plantarum* y ejercen su actividad antimicrobiana mediante un sistema de dos péptidos. Su biosíntesis es compleja y está regulada por cinco operones que abarcan un total de 21 genes. Los péptidos PlnE y PlnF conforman la plantaricina E/F, mientras que PlnJ y PlnK constituyen la plantaricina J/K; ambos sistemas actúan al formar poros en la membrana plasmática de las células diana. Estos péptidos catiónicos, con longitudes que varían entre 25 y 34 residuos, presentan actividad bactericida individual, la cual se potencia al interactuar en pares para formar complejos funcionales. Los poros generados muestran selectividad iónica distinta: la plantaricina E/F permite el paso de cationes monovalentes, mientras que la plantaricina J/K es selectiva para aniones. La acción conjunta de ambos sistemas garantiza una elevada eficacia antimicrobiana [32, 39-41].

Divergicina A

La divergicina A es una bacteriocina sintetizada por *Carnobacterium divergens* LV13 y se caracteriza por poseer un sistema de secreción dependiente de un péptido señal, el gen estructural *dvnA* codifica un precursor peptídico de 75 residuos, compuesto por una extensión N-terminal de 29 residuos y un péptido maduro de 46 residuos, con un peso molecular cercano a 4.6 kDa, este compuesto corresponde a un péptido de pequeño tamaño, con naturaleza hidrofóbica y estabilidad frente al calor. A diferencia de muchas bacteriocinas pertenecientes a la clase II, que presentan un sitio de escisión característico Gly-Gly, la divergicina A posee una secuencia de corte Ala-Ser-Ala en el extremo N-terminal, la cual actúa como señal para su exportación celular; debido a que esta señal de secreción se encuentra codificada dentro del mismo gen estructural, no es necesaria la participación de genes adicionales para el procesamiento ni para la liberación del péptido activo [32, 42, 43].

Helveticina J

La helveticina J es una bacteriocina producida por *Lactobacillus helveticus*, una bacteria presente de forma natural en quesos madurados, y posee actividad antimicrobiana frente a especies estrechamente relacionadas. Corresponde a una proteína de aproximadamente 37 kDa, sensible al calor, ya que pierde su actividad tras 30 minutos de exposición a 100 °C; el gen responsable de su síntesis se localiza en el ADN cromosómico. Hasta el momento, se dispone de información limitada sobre sus propiedades bioquímicas y su mecanismo de acción [32, 44, 45].

8. Aplicaciones biotecnológicas

Las bacteriocinas constituyen una alternativa viable y prometedora para su uso como conservadores de origen natural en la producción de alimentos procesados. Diversos estudios han demostrado su elevado potencial en la biopreservación de productos como carnes, lácteos, alimentos enlatados, pescados, bebidas alcohólicas, ensaladas, huevos, productos de panificación y vegetales fermentados, entre otros, ya sea empleada de forma individual o en combinación con otros métodos de conservación. En la industria alimentaria, las bacteriocinas pueden incorporarse de distintas maneras: 1) como cultivos iniciadores en procesos fermentativos, 2) mediante su adición directa al alimento, ya sea en forma purificada o semipurificada, y 3) como ingredientes funcionales o aditivos durante la elaboración del producto [46, 47].

Para su aplicación en alimentos, las bacteriocinas deben cumplir con diversos requisitos regulatorios. La cepa productora debe estar incluida en la categoría GRAS, lo que garantiza que no representa riesgos para la salud humana; asimismo, debe contar con la aprobación de las autoridades regulatorias correspondientes para su uso en alimentos, demostrar capacidad para inhibir uno o varios microorganismos, incluidos patógenos, y aportar beneficios tecnológicos, como la mejora de la seguridad, la calidad y/o las características sensoriales del producto.

Entre los usos más importantes de las bacteriocinas en el ámbito alimentario, destacan sus aplicaciones en diversos tipos de productos.

- a) En alimentos enlatados, como granos de elote, chícharos, papas, hongos y zanahorias, estos

compuestos se emplean para inhibir el crecimiento de microorganismos termófilos esporulados. Este tipo de alimentos suele presentar una baja acidez (pH mayor a 4.5), condición que favorece la proliferación de esporas bacterianas capaces de resistir los tratamientos térmicos aplicados durante el procesamiento, entre ellas *Geobacillus stearothermophilus* y *Thermoanaerobacter thermosaccharolyticus*. En este contexto, la incorporación de nisina ha demostrado alta eficacia para controlar dichos microorganismos y contribuir a prolongar la vida útil de los productos almacenados a temperatura ambiente [48–50].

b) En el caso de los productos marinos, la utilización de bacteriocinas puede resultar más compleja debido a características propias de estas matrices, como su baja concentración de azúcares y las condiciones de acidez del alimento; por ello, su aplicación debe realizarse cuidadosamente para evitar posibles alteraciones en la calidad del producto. No obstante, su uso ha cobrado relevancia, ya que estudios recientes han evidenciado su capacidad para inhibir *Listeria monocytogenes* en langosta y *Clostridium botulinum* en productos marinos envasados en atmósferas modificadas [51, 52].

c) En productos cárnicos, las bacteriocinas se utilizan para controlar el crecimiento de *Clostridium botulinum*, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella enterica* serovar *Typhimurium* y *Escherichia coli*; además, su empleo contribuye a reducir el uso de nitritos y compuestos relacionados, que pueden dar lugar a la formación de nitrosaminas con potencial carcinogénico [53, 54].

d) En bebidas fermentadas como el vino y la cerveza, las bacteriocinas se emplean principalmente para controlar bacterias alterantes, particularmente las bacterias ácido-lácticas de los géneros *Lactiplantibacillus*, *Pediococcus* y *Levilactobacillus*. En la elaboración del vino, estas moléculas pueden contribuir al control de bacterias responsables de fermentaciones malolácticas no deseadas, favoreciendo la estabilidad microbiológica y reduciendo defectos tecnológicos como la formación excesiva de exopolisacáridos, compuestos volátiles indeseables y concentraciones elevadas de diacetilo. En la cerveza, las bacteriocinas ayudan a prevenir la proliferación de bacterias ácido-lácticas

contaminantes, especialmente especies de *Lactobacillus* y *Pediococcus*, responsables del incremento de la acidez, la turbidez y el desarrollo de sabores indeseables asociados a la producción de diacetilo [55, 56].

e) En productos lácteos, particularmente en quesos, las bacteriocinas se emplean para controlar el crecimiento de microorganismos alterantes y patógenos sin afectar significativamente la actividad de los cultivos iniciadores, lo que contribuye a preservar las características sensoriales y a mejorar la seguridad microbiológica del producto. En postres lácteos y otros alimentos refrigerados, su incorporación permite prolongar la vida útil al inhibir el desarrollo de bacterias contaminantes y evitar tratamientos térmicos más intensos que podrían modificar sus propiedades organolépticas. Asimismo, en la leche y en productos derivados, las bacteriocinas contribuyen al control de bacterias esporuladas termorresistentes, principalmente de especies de *Bacillus* y *Clostridium*, que pueden sobrevivir a la pasteurización. En estos productos, su actividad antimicrobiana se dirige principalmente contra *Listeria monocytogenes* y especies del género *Clostridium*, responsables de importantes pérdidas económicas y de riesgos para la inocuidad alimentaria [12, 15, 57].

Se ha demostrado que las bacteriocinas presentan una elevada actividad bactericida, asociada principalmente a su contenido de cistina, basado en esta característica, se han definido tres tipos de espectro de acción:

1. Bacteriocinas con espectro inhibitorio estrecho, que afectan principalmente a microorganismos de la misma especie;
2. Bacteriocinas con espectro inhibitorio intermedio, capaces de inhibir otros géneros de bacterias lácticas, así como bacterias Gram positivas y patógenos de importancia alimentaria;
3. Bacteriocinas de amplio espectro que actúan contra una amplia variedad de bacterias Gram positivas.

La mayoría de las investigaciones indican que la actividad bactericida de las bacteriocinas se dirige principalmente contra las bacterias Gram positivas. Sin embargo, se han identificado bacteriocinas con un espectro de acción más amplio, capaces de inhibir

bacterias Gram negativas, hongos patógenos e incluso virus. Asimismo, se ha establecido que las bacteriocinas producidas por bacterias Gram positivas presentan diferentes mecanismos de acción, que dependen de su clasificación [1].

9. Tendencias emergentes y perspectivas futuras de las bacteriocinas

En los últimos años, la investigación sobre bacteriocinas ha evolucionado considerablemente, pasando de su uso tradicional como bioconservadores alimentarios a aplicaciones biotecnológicas más amplias que incluyen la medicina, la producción animal, la agricultura y el desarrollo de alimentos funcionales. Este crecimiento ha sido impulsado por la necesidad de desarrollar alternativas sostenibles ante el aumento de la resistencia a los antimicrobianos y por la demanda de conservadores naturales compatibles con el concepto de “clean label”. En este contexto, las bacteriocinas representan una de las estrategias más prometedoras para reducir el uso de antibióticos tanto en la industria alimentaria como en la producción pecuaria, debido a su elevada especificidad, baja toxicidad y reducido impacto sobre la microbiota benéfica [52, 58, 59].

Uno de los avances más importantes consiste en la aplicación de herramientas de minería genómica, de ingeniería genética e inteligencia artificial para el descubrimiento y el diseño de nuevas bacteriocinas. Actualmente, los algoritmos de aprendizaje automático, las redes neuronales profundas y los modelos generativos permiten analizar miles de secuencias peptídicas simultáneamente, predecir su actividad antimicrobiana, estabilidad estructural, toxicidad y espectro de acción antes de su validación experimental. Estas estrategias reducen significativamente el tiempo y los costos asociados al descubrimiento de nuevos péptidos antimicrobianos y facilitan el diseño racional de variantes con mayor eficacia frente a microorganismos multirresistentes [60].

De manera paralela, el desarrollo de sistemas de nanoencapsulación y microencapsulación ha permitido superar algunas de las principales limitaciones tecnológicas de las bacteriocinas, como su sensibilidad frente a proteasas, la pérdida de

actividad durante el procesamiento de alimentos y su interacción con componentes de la matriz alimentaria. Diversos sistemas basados en nanopartículas lipídicas, liposomas, quitosano, alginato y nanofibras poliméricas han demostrado mejorar la estabilidad, la liberación controlada y la actividad antimicrobiana de estos péptidos, lo que favorece su incorporación en películas comestibles, recubrimientos activos y empaques inteligentes destinados a prolongar la vida útil de los alimentos y reducir el crecimiento de microorganismos patógenos [61].

Asimismo, las perspectivas futuras de las bacteriocinas incluyen su aplicación como aditivos funcionales en la nutrición animal, como sustitutos parciales de antibióticos promotores del crecimiento, como componentes de alimentos funcionales y como agentes de biocontrol en el enfoque de Una Salud. La integración de tecnologías ómicas, herramientas bioinformáticas, edición genética y nanotecnología permitirá desarrollar bacteriocinas con propiedades optimizadas para aplicaciones específicas, consolidándolas como una de las principales alternativas biotecnológicas para fortalecer la inocuidad alimentaria, mejorar la producción pecuaria sostenible y contribuir a la mitigación de la resistencia antimicrobiana a escala global [52, 58-61].

10. Conclusiones

Las bacteriocinas producidas por bacterias ácido-lácticas representan una herramienta biotecnológica de gran relevancia por su capacidad de inhibir selectivamente el crecimiento de diversos microorganismos, en particular de patógenos de importancia alimentaria y de salud pública. Aquí se ha evidenciado que las bacteriocinas poseen mecanismos de acción específicos, alta eficacia antimicrobiana y un perfil de seguridad favorable, lo que ha permitido su aplicación exitosa en la bioconservación de alimentos y en el control de microorganismos patógenos en distintos sistemas alimentarios, además de su uso como conservadores naturales. Las bacteriocinas ofrecen ventajas significativas frente a los métodos tradicionales de conservación, ya que permiten reducir el uso de aditivos sintéticos sin comprometer la seguridad, la calidad ni la vida útil de los productos. Por otro lado, su diversidad estructural, espectro de acción y estabilidad frente a distintas condiciones ambientales amplían su potencial de aplicación en otros ámbitos de

la biotecnología. En este contexto, las bacteriocinas no solo constituyen una alternativa eficaz en la industria alimentaria, sino que también representan una opción prometedora para su incorporación en áreas como la alimentación animal, el desarrollo de probióticos y otras aplicaciones biotecnológicas, y se consolidan como compuestos de interés para futuras investigaciones y desarrollos tecnológicos.

Las investigaciones futuras deberán orientarse hacia la identificación de nuevas bacteriocinas mediante minería genómica e inteligencia artificial, el desarrollo de sistemas de nanoencapsulación y de películas activas para mejorar su estabilidad, así como la optimización de cepas productoras mediante herramientas de ingeniería genética. Asimismo, su incorporación en alimentos funcionales y en la nutrición animal representa una de las áreas con mayor potencial para contribuir a la seguridad alimentaria y a la reducción del uso de antibióticos en el marco del enfoque “Una Salud”.

Agradecimientos

A los integrantes del Cuerpo Académico de Biotecnología Veterinaria del Instituto de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Conflicto de intereses

No existe conflictos de intereses

Referencias

- [1] Beristain-Bauza SC, Palou E, López-Malo A. Bacteriocinas: antimicrobianos naturales y su aplicación en los alimentos. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos* 2012, 6(2):64-78. Microsoft PowerPoint - Portada Vol6 No2
- [2] Álvarez Sieiro P, Montalbán-López M, Mu D, Kuipers OP. Bacteriocins of lactic acid bacteria: extending the family. *Applied Microbiology and Biotechnology* 2016, 100(7):2939–2951. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7343-9>
- [3] Ghoson MD, Waill AE. Bacteriocins of lactic acid bacteria as biotechnological tools in food and pharmaceuticals: Current applications and prospects. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 2020, 28:101750. <https://doi.org/10.1016/j.cbab.2020.101750>
- [4] Camargo IP, Gómez SB, Salazar VM. Impacto de las bacteriocinas y su importancia como agentes de preservación en la industria alimentaria. *Teoría y praxis investigativa* 2009, 4(2):27-31. Dialnet-ImpactoDeLasBacteriocinasImportanciaComoPreservant-3726666.pdf
- [5] Chen X, Bai H, Mo W, Zheng X, Chen H, Yin Y, Liao Y, Chen Z, Shi Q, Zuo Z, Liang Z, Peng H. Lactic acid bacteria bacteriocins: safe and effective antimicrobial agents. *International Journal of Molecular Sciences* 2025, 26(9):4124. <https://doi.org/10.3390/ijms26094124>
- [6] Mondragón GP, Escalante PM, Osuna JAC, Ibarra VJ, Morlett JAC, Aguilar CNG, Rodríguez RH. Bacteriocinas: características y aplicaciones en alimentos. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes* 2013, 59:63-69. <https://www.redalyc.org/pdf/674/67430113008.pdf>
- [7] Putri DA, Lei J, Rossiana N, Syaputri Y. Biopreservation of food using bacteriocins from lactic acid bacteria: classification, mechanisms, and commercial applications. *International Journal of Microbiology* 2024, Article ID 8723968, 18 p. <https://doi.org/10.1155/ijm/8723968>
- [8] Nagao J. Properties and applications of lantibiotics, a class of bacteriocins produced by Gram positive bacteria. *Journal of Oral Biosciences* 2009, 51(3):158–164. <https://doi.org/10.2330/joralbiosci.51.158>
- [9] Nes IF, Brede DA, Diep DB. Chapter 16-Class II Non-lantibiotic bacteriocins. *Handbook of Biologically Active Peptides (Second Edition)*. 2013, 85-92. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385095-9.00016-6>
- [10] Kumariya R, Kumari AG, Rajput YS, Sood SK, Akhtar N, Pate S. Bacteriocins: Classification, synthesis, mechanism of action and resistance development in food spoilage causing bacteria. *Microbial Pathogenesis* 2019, 128:171-177. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2019.01.002>
- [11] Guo X, Bai X, Zheng Z, Qiu Z, Qiao X, Qiao Y. Optimization of culture conditions for bacteriocin production by *Pediococcus acidilactici* CCFM18 and characterization of its biological properties. *Fermentation* 2025, 11(8): 470. <https://doi.org/10.3390/fermentation11080470>
- [12] Liang Q, Liu Z, Liang Z, Fu X, Li D, Zhu C, Kong Q, Mou H. Current challenges and development strategies of bacteriocins produced by lactic acid bacteria applied in the food industry. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 2025, 24:e70038. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70038>
- [13] Agudelo NL, Torres-Taborda MM, Álvarez-López C, Vélez-Acosta LM. Bacteriocinas producidas por bacterias ácido-lácticas y su aplicación en la industria de alimentos. *Alimentos Hoy* 2015, 23(36). Bacteriocinas producidas por bacterias ácido lácticas y su aplicación en la industria de alimentos
- [14] Krier F, Revol-Junelles AM, Germain P. Influence of temperature and pH on production of two bacteriocins by *Leuconostoc mesenteroides* subsp. *mesenteroides* FR52 during batch fermentation. *Applied Microbiology and Biotechnology* 1998,50(3):359-63. doi:10.1007/s002530051304
- [15] Pujato SA, Mercanti DJ, Briggiler Marcó M, Capra ML, Quiberoni A, Guglielmotti DM. Bacteriocins from lactic acid bacteria: strategies for the bioprotection of dairy foods. *Frontiers in Food Science and Technology* 2024, 4:1439891. <https://doi.org/10.3389/frfst.2024.1439891>
- [16] Jawan R, Abbasiliasi S, Tan JS, Mustafa S, Halim M, Ariff AB. Influence of culture conditions and medium compositions on the production of bacteriocin-like inhibitory substances by *Lactococcus lactis* Gh1. *Microorganisms* 2020, 8(10):1454. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8101454>
- [17] Saraiva MAF, Birri DJ, Brede DA, Baracat-Pereira MC, de Queiroz MV, Nes IF, de Moraes CA, Nisin Z Production by wild strains of *Lactococcus lactis* isolated from Brazilian (Italian Type) fermented sausage. *International Journal of Microbiology* 2020, 14:2020:9309628. doi: 10.1155/2020/9309628
- [18] Bhattacharya D, Nanda PK, Pateiro M, Lorenzo JM, Dhar P, Das AK. Lactic acid bacteria and bacteriocins: novel biotechnological approach for biopreservation of meat and meat products. *Microorganisms* 2022, 10(10):2058. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10102058>
- [19] Pérez-Ramos A, Madi-Moussa D, Coucheney F, Drider D. Current knowledge of the mode of action and immunity mechanisms of LAB-bacteriocins. *Microorganisms* 2021, 9(10):2107. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9102107>
- [20] Heredia-Castro PY, Hernández-Mendoza A, González-Córdova AF, Vallejo-Córdova B. Bacteriocinas de bacteria ácido lácticas: mecanismos de acción y actividad antimicrobiana contra patógenos en quesos. *Interciencia*

2017, 42(6):340-346.

<https://www.redalyc.org/journal/339/33951621002/html/>

- [21] Demirtül F, Kaya Hİ, Ucar RA, Mitaf NA, Şimşek Ö. Expanding layers of bacteriocin applications: from food preservation to human health interventions. *Fermentation* 2025, 11(3):142. <https://doi.org/10.3390/fermentation11030142>
- [22] Öztürk B, Şengün I. Bacteriocins as food bio-preservatives: mechanism of action and applications. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology* 2024, 12(s2):2375-2397. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v12is2.2375-2397.6749>
- [23] Zhu L, Zeng J, Wang J. Structural Basis of the Immunity Mechanisms of Pediocin-like Bacteriocins. *Applied and Environmental Microbiology* 2022, 88:e00481-22. <https://doi.org/10.1128/aem.00481-22>
- [24] Camejo A, Carvalho F, Reis O, Leitão E, Sousa S, Cabanes D. The arsenal of virulence factors deployed by *Listeria monocytogenes* to promote its cell infection cycle. *Virulence* 2011, 2(5):379-394. doi: 10.4161/viru.2.5.17703
- [25] Mohedano ML, Overweg K, De La Fuente A, Reuter M, Altabe S, Mulholland F. Evidence that the essential response regulator YycF in *Streptococcus pneumoniae* modulates expression of fatty acid biosynthesis genes and alters membrane composition. *Journal of Bacteriology* 2005, 187(7):2357-2367. <https://doi.org/10.1128/JB.187.7.2357-2367.2005>
- [26] Meiers M, Volz C, Eisel J, Maurer P, Henrich B, Hakenbeck R. Altered lipid composition in *Streptococcus pneumoniae* cpoA mutants confers penicillin resistance. *BMC Microbiology* 2014, 14:12. <https://doi.org/10.1186/1471-2180-14-12>
- [27] Cotter PD, Hill C, Ross RP. Bacteriocins: developing innate immunity for food. *Nature Reviews Microbiology* 2005, 3(10):777-788. doi: 10.1038/nrmicro1273
- [28] Rose NL, Sporns P, McMullen LM. Detection of bacteriocins by matrix-assisted laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry. *Applied and Environmental Microbiology* 1999, 65(5):2238-2242. <https://doi.org/10.1128/AEM.65.5.2238-2242.1999>
- [29] Nettles CG, Barefoot SF. Biochemical and genetic characteristics of bacteriocins of food-associated lactic acid bacteria. *Journal of Food Protection* 1993, 56(4):338-356. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-56.4.338>
- [30] Sun Si-rui, Wan Feng, HE Jing, Zhang Sheng, Meng Xiang-chen. Methods for the determination of bacteriocin activity and the expression of its Titer. *Science and Technology of Food Industry* 2018, 39(16): 340-345. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.16.061
- [31] Ennahar S, Sashihara T, Sonomoto K, Ishizaki A. Class IIa bacteriocins: biosynthesis, structure and activity. *FEMS Microbiology Reviews* 2000, 24(1):85-106. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2000.tb00534.x>
- [32] González-Martínez BE, Gómez-Treviño M, Jiménez-Salas Z. Bacteriocinas de probióticos. *Revista Salud Pública y Nutrición* 2003, 4(2):1-8. <https://respyn.uanl.mx/index.php/respyn/article/view/108/92>
- [33] McAuliffe OR, Ross P, Hill C. Lantibiotics: structure, biosynthesis and mode of action, *FEMS Microbiology Reviews* 2001, 25(3):285-308. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2001.tb00579.x>
- [34] Kapalos J, Giannopoulou D, Papadimitriou K, Koliadima A. A comprehensive review of emulsion-based nisin delivery systems for food safety. *Foods* 2025, 14(8):1338. <https://doi.org/10.3390/foods14081338>
- [35] Ghazanfari N, Yazdi FT, Mortazavi SA, Javadmanesh A. A comparative framework of natural nisin variants: linking genetic basis to future bioengineering applications. *Microbial Cell Factories* 2026, 25(1):82. <https://doi.org/10.1186/s12934-026-02962-7>
- [36] Rodríguez JM, Martínez MI, Kok J. Pediocin PA-1, a wide-spectrum bacteriocin from lactic acid bacteria. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 2002, 42(2):91-121. doi: 10.1080/10408690290825475
- [37] Christmann J, Cao P, Becker J, Desiderato CK, Goldbeck O, Riedel CU, Kohlstedt M, Wittmann C. High-efficiency production of the antimicrobial peptide pediocin PA-1 in metabolically engineered *Corynebacterium glutamicum* using a microaerobic process at acidic pH and elevated levels of bivalent calcium ions. *Microbial Cell Factories* 2023, 22:41. <https://doi.org/10.1186/s12934-023-02044-y>
- [38] Goldbeck O, Desef DN, Ovchinnikov KV, Perez-Garcia F, Christmann J, Sinner P, Crauwels P, Weixler D, Cao P, Becker J, Kohlstedt M, Kager J, Eikmanns BJ, Seibold GM, Herwig C, Wittmann C, Bar NS, Diep DB, Riedel CU. Establishing recombinant production of pediocin PA-1 in *Corynebacterium glutamicum*. *Metabolic Engineering* 2021, 68:34-45. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2021.09.002>
- [39] Anderssen EL, Diep DB, Nes IF, Eijsink VGH, Nissen-Meyer J. Antagonistic activity of *Lactobacillus plantarum* C11: two new two-peptide bacteriocins, plantaricins EF and JK, and the induction factor Plantaricin A. *Applied and Environmental Microbiology* 1998, 64. <https://doi.org/10.1128/AEM.64.6.2269-2272.1998>
- [40] Azzahra RN, Putri FD, Wulandari AP, Lei J, Syaputri Y. Plantaricin: production dynamics, functional applications, and challenges in food biopreservation, *Journal of Food Processing and Preservation* 2025, Article ID 6215738, 19 p. <https://doi.org/10.1155/jfpp/6215738>
- [41] Liu Y, Liu S, Li Z, Huo C, Wang G, Zeng X, Xin B, Zhao D. LuxR-Type regulator RRP6 positively regulates the biosynthesis of plantaricin EF and improves its production in *Lactiplantibacillus plantarum* 163. *Microorganisms* 2025, 13(12):2780. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13122780>
- [42] Worobo RW, Van Belkum MJ, Sailer M, Roy KL, Vederas JC, Stiles ME. A signal peptide secretion-dependent bacteriocin from *Carnobacterium divergens*. *Journal of Bacteriology* 1995, 177(11):3143-3149. DOI:10.1128/jb.177.11.3143-3149.1995
- [43] Begrem S, Ivaniuk F, Gigout-Chevalier F, Kolypczuk L, Bonnetot S, Leroi F, Grovel O, Delbarre-Ladrat C, Passerini D. New insight into antimicrobial compounds from food and marine-sourced *Carnobacterium* species through phenotype and genome analyses. *Microorganisms* 2020, 8(7):1093. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8071093>
- [44] Joerger MC, Klaenhammer TR. Characterization and purification of helveticin J and evidence for a chromosomally determined bacteriocin produced by *Lactobacillus helveticus* 481. *Journal of Bacteriology* 1986, 167(2):439-446. <https://doi.org/10.1128/jb.167.2.439-446.1986>
- [45] Liu C, Xu L, Chen S, Wang S, Ly M, Dong K, Lin O, Cao Z. Whole-genome sequencing and probiotic properties of *Lactobacillus helveticus* KM7 isolated from the gut of the Chinese honeybee (*Apis cerana*): A promising exopolysaccharide-producing strain. *BMC Microbiology* 2025, 25:530. <https://doi.org/10.1186/s12866-025-04286-9>
- [46] Laranjo M, Elias M, Potes ME, de Melo LF, Dapkevicius ML. The use of starter cultures in traditional meat products: antimicrobial activity. *Journal of Food Quality* 2017, Article ID 9546026. <https://doi.org/10.1155/2017/9546026>
- [47] Rus-Fernández P, Fuentes A. Fermentation starters and bacteriocins as biocontrol strategies for table olives preservation: a mini-review. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 2024, 105(7):3550-3556. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13874>
- [48] Thomas LV, Ingram RE, Bevis HE, Davies EA, Milne CF, Delves-Broughton J. Effective use of nisin to control *Bacillus* and *Clostridium* spoilage of a pasteurized mashed potato product. *Journal of Food Protection* 2002, 65(10):1580-1585. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-65.10.1580>
- [49] Naim F, Zareifard MR, Zhu S, Huizing RH, Grabowski S, Marcotte M. Combined effects of heat, nisin and acidification on the inactivation of *Clostridium sporogenes* spores in carrot-alginate particles: From kinetics to process validation. *International Journal of Food Microbiology* 2008, 25(7):936-941. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2008.06.005>
- [50] Anumudu C, Hart A, Miri T, Onyeaka H. Recent advances in the application of the antimicrobial peptide nisin in the inactivation of spore-forming bacteria in foods. *Molecules* 2021, 26:5552. <https://doi.org/10.3390/molecules26185552>

- [51] Iseppi R, Camellini S, Zurlini C, Cigognini IM, Cannavacciuolo M, Messi P. Essential oils and bacteriocin-based active edible coating: an innovative, natural and sustainable approach for the control of *Listeria monocytogenes* in seafoods. *Applied Sciences* 2023, 13:2562. <https://doi.org/10.3390/app13042562>
- [52] Obafemi YD, Obiukwu AC, Oranusi SU. Revisiting the application, current trends, and prospect of bacteriocins in food preservation. *Discover Food* 2025, 5:165. <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00472-w>
- [53] Ashaolu TJ, Reale A. A holistic review on euro-asian lactic acid bacteria fermented cereals and vegetables. *Microorganisms* 2020, 8(8):1176. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8081176>
- [54] Khan I, Nkufi CT, Miskeen S, Lee BH, Oh D. Hurdle technology: A novel approach for enhanced food quality and safety-A review. *Food Control* 2017, 73(Part B):1426-1444. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.11.010>
- [55] Wade ME, Strickland MT, Osborne JP, Edwards CG. Role of *Pediococcus* in winemaking. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 2019, 25:7-24. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12366>
- [56] Caiza-Valencia C, Izquierdo Romero A, Veloz-Villavicencio E, Coronel-León J. Native microorganisms as natural enhancers in craft beer and wine production. *Frontiers in Microbiology* 2026, 17:1754472. doi: 10.3389/fmicb.2026.1754472
- [57] And HC, Hoover DG. Bacteriocins and their food applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 2003, 2(3):82-100. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2003.tb00016.x>
- [58] Meskhi B, Todorov SD, Rudoy D, Olshevskaya A, Shevchenko V, Maltseva T, Mirzoyan A, Kozyrev D, Odabashyan M, Teplyakova S, Mazanko M. Bacteriocins, a new generation of sustainable alternatives to antibacterial agents in primary food production systems. *Molecules* 2026, 31(2):356. <https://doi.org/10.3390/molecules31020356>
- [59] Ng ZJ, Zarin MA, Lee CK, Tan JS. Application of bacteriocins in food preservation and infectious disease treatment for humans and livestock: a review. *RSC Advances* 2020, 10:38937–38964. <https://doi.org/10.1039/D0RA06161A>
- [60] Ibisani TA, Jiang X, Willcox M, Kumar N. Recent advances in computational antimicrobial peptide discovery through big data, modeling, and artificial intelligence and their interplay in ushering the next golden era of drug development. *Frontiers in Bioinformatics* 2026, 6:1749404. <https://doi.org/10.3389/fbinf.2026.1749404>
- [61] Shafique B, Ranjha MMAN, Murtaza MA, Walayat N, Nawaz A, Khalid W, Mahmood S, Nadeem M, Manzoor MF, Ameer K, Aadil RM, Ibrahim SA. Recent trends and applications of nanoencapsulated bacteriocins against microbes in food quality and safety. *Microorganisms* 2022, 11(1):85. doi:10.3390/microorganisms11010085