

Sección: Hot Science

Lactobacilos y la producción ecológica de nanopartículas de plata con actividad antibacteriana

Lactobacilli and the green production of silver nanoparticles with antibacterial activity

Mary José Huitrón-García¹

María de Lourdes Reyes-Escogido^{2*}

¹Laboratorio de Microbiología, ²Laboratorio de Metabolismo. Departamento de Medicina y Nutrición, División de Ciencias de la Salud, Campus León, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México.

Autor para la correspondencia: ml.reyes@ugto.mx

RESUMEN

La creciente resistencia antimicrobiana representa un desafío de salud global que dificulta el tratamiento de diversas infecciones. Ante este escenario, las nanopartículas de plata han surgido como una alternativa para la eliminación de patógenos. Aunque existen múltiples rutas de obtención, la síntesis mediada por microorganismos o sus metabolitos destaca por su sostenibilidad. Dentro de este enfoque, el uso de lactobacilos resulta especialmente prometedor, ya que permite un control más preciso sobre la morfología y el tamaño de las nanopartículas, optimizando así su potencia antibacteriana.

Palabras clave: AgNPs, lactobacilos, actividad antibacteriana.

SUMMARY

The growing antimicrobial resistance represents a global health challenge that complicates the treatment of various infections. In this scenario, silver nanoparticles have emerged as an effective alternative for pathogen elimination. Although there are multiple synthesis routes, biogenic synthesis mediated by microorganisms or their metabolites stands out for its sustainability. Within this approach, the use of lactobacilli is particularly promising, as it allows for more precise control over the morphology and size of the nanoparticles, thereby optimizing their antibacterial potency.

Keywords: AgNPs, lactobacilli, antibacterial activity.

Introducción

En los últimos años, el campo de la nanotecnología ha atraído la atención debido a sus múltiples aplicaciones. Las nanopartículas de plata (AgNPs), en particular, destacan por su histórica y comprobada actividad antibacteriana. Ante el aumento de bacterias que han desarrollado resistencia a múltiples antibióticos – fenómeno conocido como multirresistencia-, el tratamiento de las infecciones se ha vuelto cada vez más difícil. En este contexto, las AgNPs surgen como una alternativa eficaz para la eliminación de estos patógenos.

Estas diminutas partículas pueden obtenerse mediante distintos métodos físicos, químicos o biológicos. Entre ellos, los procesos biológicos han ganado popularidad porque son sencillos, rápidos y ecológicos, ya que, en lugar de emplear sustancias químicas, utilizan organismos vivos como bacterias, hongos o plantas para llevar a cabo la síntesis utilizando una sal como sustrato [1].

El empleo de bacterias para la síntesis de AgNPs, ofrece la ventaja de que estos microorganismos pueden crecer en medios de cultivo simples, esto es que se elaboran con los nutrientes básicos necesarios para su crecimiento, y son económicos. Además, las bacterias se desarrollan con mayor rapidez en comparación con los hongos y las plantas, los cuales requieren periodos más prolongados tanto para su crecimiento como para la producción de las nanopartículas.

Algunas bacterias, incluidos ciertos lactobacilos, tienen la capacidad de sintetizar AgNPs de forma intracelular o extracelular [2]. Este proceso involucra la participación de enzimas reductoras, como las nitrato reductasas y las óxido reductasas, así como de proteínas, polisacáridos y otros compuestos que se generan durante el crecimiento bacteriano, conocidos en conjunto como metabolitos. Estos compuestos actúan reduciendo los iones de plata (Ag^+) a plata metálica (Ag^0), dando lugar

a la formación de nanopartículas. Además, las proteínas y polisacáridos pueden actuar como agentes estabilizadores, evitando la agregación de las nanopartículas y favoreciendo su estabilidad. Esto es importante, ya que tanto la morfología como el tamaño influyen directamente en su capacidad antimicrobiana: a menor tamaño, mayor es la efectividad; por lo tanto, la aglomeración de las nanopartículas reduce significativamente su potencia biológica.

¿Qué son las nanopartículas de plata?

Las AgNPs son estructuras extremadamente pequeñas: miden entre 1 y 100 nanómetros, lo que significa que son miles de veces más delgadas que un cabello humano. A pesar de su reducido tamaño, pueden presentar una gran variedad de formas, como esferas, barras, cubos, triángulos, hexágonos, flores, además de otras [3] (Figura 1).

Debido a sus propiedades fisicoquímicas, las AgNPs se han incorporado a una amplia gama de productos comerciales, tales como apósitos, hidrogeles, ungüentos, recubrimientos para catéteres y sondas, filtros para agua, ropa, forros y plantillas de zapatos, así como películas biodegradables para el empaque de alimentos [4]. Todos estos artículos tienen como objetivo reducir o eliminar la proliferación de bacterias y otros microorganismos, como hongos y virus. Además, al inhibir ciertas bacterias, es posible prevenir los malos olores generados por su actividad metabólica (figura 2).

En general, para la elaboración de estos productos, las AgNPs se incorporan directamente en la matriz que se utiliza de soporte, como las ceras empleadas en la formulación de ungüentos o los polímeros utilizados en hidrogeles, apósitos y empaques. Por ejemplo, en el caso particular de los textiles, el método



Figura 1. Las AgNPs pueden presentarse en diversas morfologías, tal como se ilustra en la figura, siendo la esférica la más común. Los tamaños pueden variar entre 1 nm y 100 nm, dependiendo de los métodos de síntesis empleados. Ilustración creada con Gemini.



Figura 2. En el mercado se pueden conseguir productos como cremas, apósitos, desodorantes, recubrimientos antibacterianos, limpiadores, ropa, filtros para agua, etc. La función principal de estos productos es inhibir la proliferación microbiana. Ilustración creada con Gemini.

más común consiste en sumergirlos en soluciones que contienen AgNPs y, posteriormente, secarlos a altas temperaturas para favorecer la adhesión de las nanopartículas a las fibras. Es importante señalar que el proceso de fabricación varía en función del producto que se desee obtener [5].

¿Qué son los lactobacilos y cómo producen nanopartículas de plata?

Los lactobacilos pertenecen a un grupo de bacterias conocidas como bacterias ácido-lácticas (BAL); muchas de ellas poseen efectos benéficos para la salud humana y son consideradas como probióticas, estando

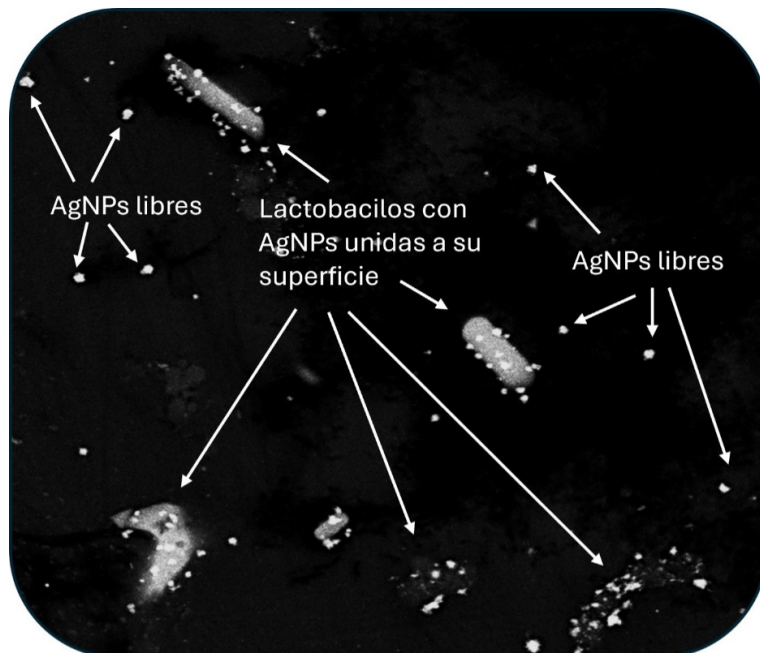


Figura 3. Las AgNPs sintetizadas por los metabolitos de los lactobacilos presentes en el medio se encuentran libres. Por otro lado, la bacteria puede sintetizar las nanopartículas de forma intracelular y después liberarlas al medio, o bien de manera extracelular empleando componentes de su propia estructura, lo que mantiene las nanopartículas adheridas a la superficie celular. La imagen obtenida mediante un microscopio electrónico de barrido permite apreciar tanto la morfología de las células bacterianas como la presencia y distribución de las nanopartículas. Imagen propia del autor.

presentes en alimentos de consumo habitual como el yogurt.

Algunas de estas bacterias tienen la capacidad de sintetizar AgNPs a partir de una sal de plata, sin necesidad de utilizar otras sustancias químicas. A este proceso se le conoce como “síntesis verde” ya que, al utilizar los organismos vivos o sus metabolitos, se reduce significativamente el impacto ambiental.

Aunque la principal función de las AgNPs es su actividad antimicrobiana, en algunas bacterias, como los lactobacilos, este efecto puede verse atenuado. Esto se debe a que las AgNPs que se generan pueden quedar encapsuladas por las proteínas y polisacáridos presentes en el medio de cultivo, lo que reduce su toxicidad y favorece la supervivencia bacteriana. Además, la pared celular de estos microorganismos es relativamente gruesa, por lo

que actúa como una barrera física que dificulta la penetración de las nanopartículas y, en consecuencia, disminuye sus efectos adversos.

Las AgNPs pueden formarse tanto dentro (intracelular) como fuera (extracelular) de la célula bacteriana [6]. En consecuencia, las nanopartículas, pueden localizarse dentro de la célula, o fuera de ella ya sea adheridas a su superficie o libres en el medio (Figura 3). Esto sugiere que tanto los metabolitos secretados por la bacteria como algunos componentes estructurales de la célula pueden participar en el proceso de síntesis.

En la producción extracelular, se emplea el medio de cultivo que contiene los compuestos liberados por las bacterias durante su crecimiento. Entre estos compuestos se encuentran enzimas, proteínas, ácidos orgánicos, iones, polisacáridos e incluso pigmentos, los cuales actúan como agentes reductores. Posteriormente, el medio libre de células bacterianas se mezcla con una sal de plata, y los compuestos presentes en él reducen los iones de plata para formar nanopartículas. Al mismo tiempo, algunos de estos compuestos actúan como agentes estabilizadores, evitando la aglomeración de las nanopartículas [6].

En cambio, en la producción intracelular, la sal de plata se añade directamente al medio de cultivo donde crecen los lactobacilos. Las nanopartículas se forman dentro de las células bacterianas durante su crecimiento. Este método permite un mayor control sobre el tamaño y la forma de las AgNPs, ya que pueden ajustarse parámetros como el pH, la temperatura o la composición del medio.

Desde un punto de vista práctico, la producción extracelular suele preferirse porque facilita la recuperación de las nanopartículas. En cambio, aunque la producción intracelular ofrece un mayor control sobre sus caracterís-

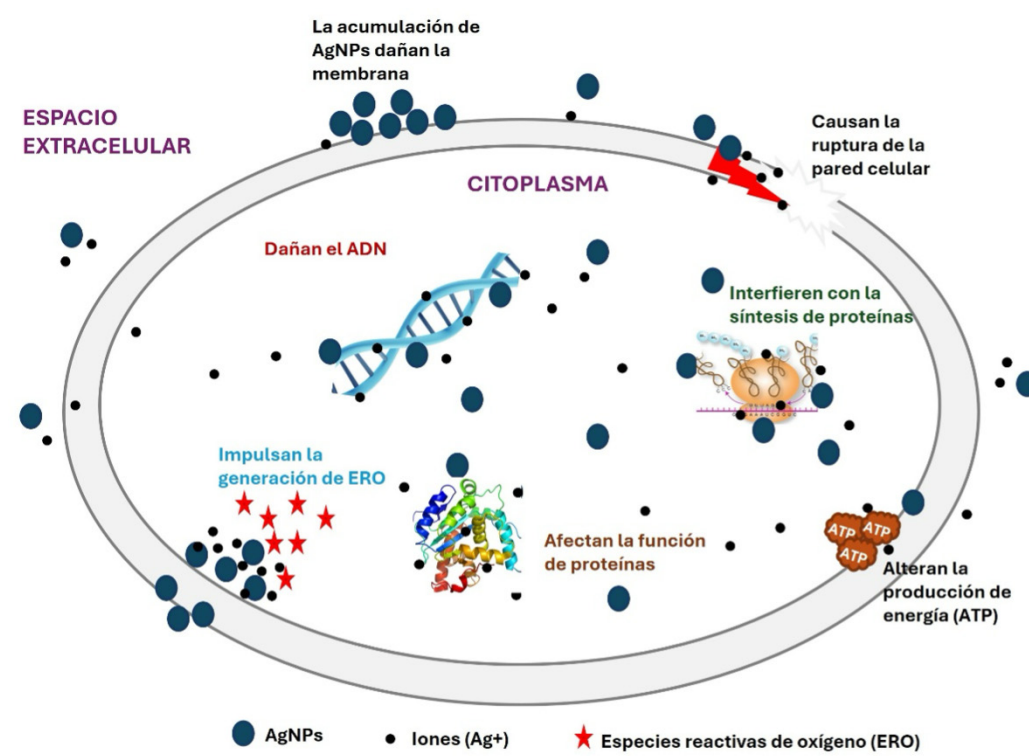


Figura 4. Las AgNPs pueden actuar directamente contra la célula bacteriana al romper la pared celular, dañar el ADN o alterar la síntesis de proteínas, o indirectamente al inducir la formación de especies reactivas de oxígeno (ERO), las cuales afectan la producción de energía y también pueden dañar el ADN e interferir con la síntesis y función de proteínas.

ticas, requiere pasos adicionales, como la ruptura de las células y la posterior recuperación de las nanopartículas, lo que hace que el proceso sea más largo y complejo.

¿Cómo actúan las nanopartículas de plata contra las bacterias?

Las AgNPs son eficaces contra una amplia variedad de bacterias patógenas, incluidas algunas que han desarrollado multirresistencia a los antibióticos [1]. Por esta razón, se han utilizado como agentes antibacterianos, principalmente en las industrias textil, alimentaria y médica. Su efectividad depende, en gran medida de su tamaño y forma; en particular, las nanopartículas de menor tamaño (inferiores a 10 nm) y de forma triangular suelen ser más potentes debido a que tienen una mayor superficie de contacto. No obstante, las formas esféricas son las más comunes.

El efecto antibacteriano de las AgNPs se atribuye a la liberación continua de iones de plata (Ag⁺) por parte de las nanopartículas, los cuales afectan directa o indirectamente la viabilidad celular (Figura 4), mediante uno o varios de los mecanismos que se describen a continuación:

1. Los iones de plata dañan la pared celular bacteriana, provocando la pérdida del contenido intracelular y, en consecuencia, la muerte de la célula.
2. Las especies reactivas de oxígeno generadas por la acción de los iones inducen estrés oxidativo y alteran la cadena respiratoria, interrumpiendo la producción de energía afectando la viabilidad bacteriana.
3. Los iones de plata pueden unirse a proteínas, enzimas y al ADN, afectando funciones metabólicas esenciales y procesos celulares indispensables para la

supervivencia de la bacteria [7].

A pesar de sus múltiples mecanismos de acción, existe la posibilidad de que ciertas cepas bacterianas desarrollen resistencia a las AgNPs a largo plazo. Dado que este fenómeno aún es objeto de investigación y no se han esclarecido totalmente sus causas, se ha propuesto la combinación de estas nanopartículas con otras sustancias, tales como extractos vegetales, polímeros o antibióticos convencionales. Este enfoque busca generar un efecto sinérgico que potencie su actividad antimicrobiana y reduzca la probabilidad de desarrollar resistencia a las AgNPs por parte de los microorganismos.

Conclusiones

Las AgNPs representan una alternativa prometedora frente a la multiresistencia bacteriana. Cuando se sintetizan mediante métodos biológicos, como el uso de lactobacilos, ofrecen ventajas competitivas, destacando una mayor biocompatibilidad y un control más preciso de sus propiedades fisicoquímicas.

Aunque los mecanismos moleculares mediante los cuales estos microorganismos producen las nanopartículas no se conocen por completo, la síntesis verde mediada por lactobacilos se perfila como una ruta biotecnológica viable y sostenible. No obstante, para garantizar aplicaciones seguras y efectivas en el futuro, resulta imperativo profundizar en el estudio de su toxicidad en humanos y en los mecanismos de resistencia que las bacterias podrían desarrollar ante este nanomaterial.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dirección de Apoyo a la Investigación y Posgrado de la Universidad de Guanajuato, por financiamiento otorgado al proyecto 132/2022 de la convocato-

ria CIIC2022. Se declara que se utilizaron las herramientas Gemini para generación de imágenes y ChatGPT-4 para revisión de ortografía y estilo.

Referencias

- [1] Siddiqi, K. S., et al. (2018). A review on biosynthesis of silver nanoparticles and their biocidal properties. *Journal of Nanobiotechnology*, 16(1), 14. <https://doi.org/10.1186/s12951-018-0334-5>
- [2] Garmasheva, I., et al. (2016). Lactobacillus species mediated synthesis of silver nanoparticles and their antibacterial activity against opportunistic pathogens *in vitro*. *Bioimpacts*, 6(4), 219-223. <https://doi.org/10.15171/bi.2016.29>
- [3] Zhang, X.-F., et al. (2016). Silver Nanoparticles: Synthesis, Characterization, Properties, Applications, and Therapeutic Approaches. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(9), 1534. <https://doi.org/10.3390/ijms17091534>
- [4] Yaqoob, A. A., et al. (2020). Recent Advances in Metal Decorated Nanomaterials and Their Various Biological Applications: A Review. *Frontiers in Chemistry*, 8, 341. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00341>
- [5] dos Santos, L.M.G., et al. (2025). Unravelling the effects of silver nanoparticles on textiles: a comprehensive toxicological and quantitative analysis. *Health Nanotechnology*, 1, 6. <https://doi.org/10.1186/s44301-025-00006-4>
- [6] Ghosh, S., et al. (2022). Nanobiotechnological prospects of probiotic microflora: Synthesis, mechanism, and applications. *Science of the Total Environment*. 2022 Sep 10;838 (Pt 3):156212. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156212
- [7] Bruna, T., et al. (2021). Silver Nanoparticles and Their Antibacterial Applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(13), 7202. <https://doi.org/10.3390/ijms22137202>