

Residuos agroindustriales como plataforma sostenible para la síntesis verde de nanopartículas de plata: Un artículo de revisión

Agroindustrial Waste as a Sustainable Platform for the Green Synthesis of Silver Nanoparticles: A review

Jonatan Valencia-Payan^{1*}, Jhonatan Gutiérrez-Garaviz¹, Sandra Patricia Medina²

¹Grupo de investigación GIDESTH, Centro de la Industria, la Empresa y los Servicios, Regional Huila, Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA. jvalenciap@sena.edu.co. <https://orcid.org/0000-0002-7828-2808>.

¹Grupo de investigación GIDESTH, Centro de la Industria, la Empresa y los Servicios, Regional Huila, Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA. jgutierrezg@sena.edu.co. <https://orcid.org/0000-0002-6843-146X>.

²Centro de la Industria, la Empresa y los Servicios, Regional Huila, Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA. spmedina@sena.edu.co.

*Autor de correspondencia: jvalenciap@sena.edu.co

Como citar:

Valencia-Payan, J., Gutiérrez-Garaviz, J., & Medina, S. P. (2024). Residuos agroindustriales como plataforma sostenible para la síntesis verde de nanopartículas de plata: Un artículo de revisión. **Revista Agropecuaria y Agroindustrial La Angostura**, 10(4), 56-75.



Resumen

Las nanopartículas de plata (AgNPs) son agentes de gran interés por su aplicación en medicina, agricultura y remediación ambiental. Sin embargo, los métodos tradicionales para su síntesis presentan inconvenientes como el uso de productos químicos tóxicos y costos altos. Los residuos de cultivos, como cáscaras de cacao, passifloras, cascarilla de arroz, bagazo de caña de azúcar, entre otros, son ricos en compuestos bioactivos que pueden actuar como agentes reductores y estabilizadores en la síntesis de AgNPs. Este enfoque “verde” no solo reduce el impacto ambiental, sino que también agrega valor a los residuos. La presente revisión aborda los diferentes tipos de residuos utilizados, los mecanismos de síntesis, las técnicas de caracterización y las aplicaciones de las AgNPs sintetizadas. Se discuten los beneficios

ambientales y económicos, como la reducción de residuos y la creación de productos de valor agregado. Finalmente, se presentan los desafíos y perspectivas futuras de esta área, destacando la necesidad de optimizar los procesos de síntesis y la evaluación de la toxicidad de las AgNPs obtenidas. El uso de residuos agroindustriales para la síntesis verde de AgNPs se presenta como una estrategia prometedora para una nanotecnología más sostenible.

Palabras clave. Nanopartículas de plata, química verde, valorización de residuos, compuestos bioactivos.

Abstract

Silver nanoparticles (AgNPs) are of great interest due to their applications in medicine, agriculture, and environmental remediation. However, traditional synthesis methods have drawbacks, such as the use of toxic chemicals and high costs. Agricultural waste, such as cocoa husks, passion fruit peels, rice husk, sugarcane bagasse, among others, are rich in bioactive compounds that can act as reducing and stabilizing agents in the synthesis of AgNPs. This “green” approach not only reduces environmental impact but also adds value to the waste. This review addresses the different types of residues used, the synthesis mechanisms, characterization techniques, and applications of the synthesized AgNPs. Environmental and economic benefits, such as waste reduction and the creation of value-added products, are discussed. Finally, the challenges and future perspectives of this field are presented, highlighting the need to optimize synthesis processes and evaluate the toxicity of the obtained AgNPs. The use of agro-industrial waste for the green synthesis of AgNPs is presented as a promising strategy for a more sustainable nanotechnology.

Keywords. Silver Nanoparticles, green chemistry, waste valorization, bioactive compounds.

Introducción

La nanotecnología ha emergido como un campo multidisciplinario con un enorme potencial para revolucionar diversos sectores, incluyendo la medicina, la agricultura, la electrónica y la ciencia de los materiales. En este contexto, las nanopartículas de plata (AgNPs) han ganado una atención considerable debido a sus propiedades únicas, como su actividad antimicrobiana de amplio espectro, conductividad eléctrica y propiedades ópticas (Sánchez-López, Gomes, Esteruelas, Bonilla, Laura López-Machado, et al., 2020; Silveira et al., 2022; Thirumurugan et al., 2012). Estas propiedades han impulsado el uso de AgNPs en una amplia gama de aplicaciones, desde la medicina y la agricultura hasta la electrónica y la remediación ambiental (Burduşel et al., 2018; Flores-Contreras et al., 2024a; Sánchez-López, Gomes, Esteruelas, Bonilla, López-Machado, et al., 2020; Syafiuddin et al., 2017; Zhang et al., 2016).

Si bien los métodos tradicionales de síntesis de AgNPs ofrecen un gran potencial en diversas aplicaciones, también presentan desafíos significativos, pues estos métodos suelen ser costosos, demandan altas cantidades de energía y generan residuos tóxicos, lo que plantea serias preocupaciones ambientales y de salud; y a su vez ha impulsado la búsqueda de alternativas más sostenibles y eficientes para la síntesis de estas partículas (Andreani et al., 2017; Beyene et al., 2017; Calderón-Jiménez et al., 2017; Jorge de Souza et al., 2019; Tortella et al., 2020)

La búsqueda de métodos de síntesis más sostenibles ha impulsado el desarrollo de rutas “verdes” que utilizan sistemas biológicos como plantas, bacterias, hongos, algas, entre otros, para producir nanopartículas, mientras se reduce el uso de productos químicos tóxicos, y se aprovecha la abundancia y el bajo costo de los recursos biológicos (Flores-Contreras et al., 2024a; Khan et al., 2022; Parveen et al., 2016; Rajakumar et al., 2023; Singh et al., 2016; Verma et al., 2019; Virkutyte & Varma, 2013).

En este contexto, los residuos agroindustriales, subproductos generados en grandes cantidades por las industrias agrícolas y de alimentos, han surgido como una materia prima prometedora para la síntesis verde de AgNPs (Ali et al., 2020; Bartolucci et al., 2020; Bastos-Arrieta et al., 2018; Hernández-Díaz et al., 2021; Pal et al., 2019; Peralta-Videa et al., 2016; Silva et al., 2019). Estos residuos son ricos en compuestos bioactivos, como polifenoles, flavonoides y proteínas, que pueden actuar como agentes reductores y estabilizadores en la síntesis de AgNPs (Alarcón et al., 2021; Bastos-Arrieta et al., 2018; Chung et al., 2016; Flores-Contreras et al., 2024a; González-Conde et al., 2023; Wei et al., 2022).

Por otra parte, el departamento del Huila, una región caracterizada por su diversidad agrícola y alta producción de cultivos de café, cacao, plátano, y frutas tropicales entre otros, genera una gran cantidad de residuos agroindustriales que, a menudo, son subutilizados o descartados sin un procesamiento adecuado (Gómez et al., 2020). Sin embargo, como se mencionó anteriormente, estos residuos representan una fuente valiosa de compuestos bioactivos que podrían ser aprovechados para la síntesis verde de AgNPs, contribuyendo así, no solo a la valorización de estos subproductos, sino también al desarrollo de tecnologías más sostenibles en la región.

Este artículo de revisión tiene como objetivo proporcionar una descripción general del uso de residuos agroindustriales en la síntesis verde de AgNPs, específicamente aquellos de interés para el departamento del Huila. Se examinarán los diferentes tipos de residuos utilizados, los mecanismos de síntesis implicados, las técnicas de caracterización empleadas y las diversas aplicaciones de las AgNPs sintetizadas. Además, se discutirán los beneficios ambientales, así como los desafíos y las perspectivas futuras.

Métodos de síntesis verde de AgNPs a partir de residuos agroindustriales

La síntesis verde de nanopartículas de plata (AgNPs) es un enfoque ecológicamente amigable que utiliza entidades biológicas como plantas y microorganismos para producir nanopartículas, el cual está alineado con los principios de sostenibilidad y biocompatibilidad, evitando el uso de productos químicos tóxicos que generalmente están involucrados en los métodos de síntesis convencionales (Banerjee & Ravishankar Rai, 2022; Yadav & Tare, 2024). La síntesis verde implica principalmente la reducción de iones de plata a nanopartículas de plata utilizando materiales biológicos, como los extractos de plantas ricos en fitoquímicos, usados comúnmente como agentes reductores y estabilizadores, como son los flavonoides, los terpenoides y los polifenoles, que facilitan la reducción de iones de plata y estabilizan las nanopartículas, eliminando la necesidad de agentes estabilizantes tóxicos (Odongo et al., 2022).

Es importante destacar que la elección del material vegetal puede influir en el tamaño y la funcionalidad de las nanopartículas, siendo las plantas etnobiomédicas como *Azadirachta indica* y *Hibiscus rosa-sinensis* conocidas por producir nanopartículas con propiedades terapéuticas mejoradas (Odongo et al., 2022). Además, los microorganismos también juegan un papel significativo en la síntesis verde de AgNPs, pues estos pueden ser cultivados *In vitro* a gran escala, proporcionando un método rentable y escalable para la producción de nanopartículas (Consolo et al., 2020).

Por otro lado, el mecanismo de síntesis implica la resistencia microbiana a los iones metálicos, resultando en la formación de bio-nanopartículas de varios tamaños y formas (Banerjee & Ravishankar Rai, 2022), en donde los factores claves que influyen el proceso incluyen la temperatura de reacción, el pH y la concentración de iones metálicos, que afectan el tamaño y la aglomeración de las nanopartículas, por lo que es necesario su control para obtener nanopartículas más pequeñas y no aglomeradas, las cuales poseen una mayor actividad microbiana y por ende una mejor efectividad en la administración de fármacos (Backx et al., 2021). A pesar de las ventajas, los desafíos como la aglomeración de partículas y la aparición de resistencia microbiana a las AgNPs deben ser abordados, por lo que en futuras investigaciones debe incluirse la optimización de los parámetros de síntesis y la exploración de terapias combinadas para mejorar la eficacia y estabilidad de las AgNPs en diversas aplicaciones (Backx et al., 2021; Yadav & Tare, 2024).

Residuos agroindustriales utilizados en síntesis de AgNPs

A continuación, se presentan algunos ejemplos de residuos agroindustriales que han sido utilizados con éxito en la síntesis de AgNPs, y que resultan de interés para el sector agroindustrial, así como, se pueden observar en la **Tabla 1**, las principales características de las AgNPs obtenidas mediante reducción biogénica utilizando distintos residuos agroindustriales de interés para el departamento del Huila.

Cáscaras de cacao.

Los compuestos bioactivos presentes en los extractos de cáscaras de vainas de cacao (ECVC), son ricos en polifenoles, flavonoides y otras moléculas bioactivas que influyen significativamente en la morfología y la estabilidad de las AgNPs, siendo crucial en la síntesis biogénica de estas partículas (Belwal et al., 2022; Efavi et al., 2022). Estos compuestos facilitan la reducción de los iones de plata (Ag^+) a plata elemental (Ag^0), lo que lleva a la formación de nanopartículas. Además, la presencia de compuestos fenólicos y flavonoides, confirmada por la espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR), indica su implicación en la reducción y estabilización de las AgNPs, proporcionando una capa protectora que mejora la estabilidad de las nanopartículas (Efavi et al., 2022). La morfología de las AgNPs sintetizadas con ECVC está influenciada por los compuestos bioactivos específicos presentes, como es el caso de las bandas de resonancia plasmónica superficial (SPR) observadas en la espectroscopía UV-visible que indican variaciones en el tamaño y la distribución de las partículas, en donde las AgNPs derivadas de la vaina de cacao muestran un SPR de 440 nm, lo que sugiere un tamaño de partícula mayor en comparación con los derivados de las hojas de cacao (Efavi et al., 2022). Los estudios de microscopía electrónica de transmisión (TEM) revelan además que las AgNPs son monodispersas y esféricas, con tamaños que oscilan entre 6 y 18 nm, según la parte específica de la planta de cacao utilizada para la extracción (Thatikayala et al., 2019). Por otra parte, la estabilidad de estas nanopartículas también se ve afectada por los compuestos bioactivos, como se ha evidenciado en AgNPs derivadas de la cáscara de cacao, en donde las mediciones del potencial zeta, que indican la carga superficial y la estabilidad de las nanopartículas, muestran que las AgNPs tienen un potencial zeta de -0,93 mV, lo que sugiere una estabilidad moderada (Efavi et al., 2022). Ahora, los compuestos bioactivos formadores de capas protectoras contribuyen a esta estabilidad al evitar la aglomeración y proporcionar una barrera protectora contra los factores ambientales.

Residuos de café.

Los compuestos bioactivos presentes en los extractos de residuos de café, en particular los restos de café usados (RCU) resultantes de la preparación de café, ya sea por filtración, prensa francesa, o cualquier otro método de preparación, influyen significativamente en la morfología y la estabilidad de las AgNPs a través de su función como agentes reductores y estabilizadores (Flores-Contreras et al., 2024b). Los RCU son ricos en compuestos fenólicos, incluidos los ácidos cafeoilquínicos, que son cruciales para la síntesis ecológica de las AgNPs. Estos compuestos facilitan la reducción de los iones de plata a nanopartículas de plata y proporcionan una capa protectora que estabiliza las nanopartículas, lo que evita la aglomeración y garantiza una distribución de tamaños estrecha (Yust et al., 2022; Zuorro et al., 2022). El proceso de síntesis que utiliza extractos de RCU da como resultado AgNPs altamente cristalinas con una distribución de tamaño estrecha, como lo demuestran técnicas como la dispersión dinámica de luz (DLS), la microscopía electrónica de transmisión (TEM) y la difracción de rayos X (XRD) (Keijok et al., 2019). En condiciones óptimas, las AgNPs producidas tienen un tamaño promedio de aproximadamente 10 nm y muestran un potencial zeta que oscila entre -30,5 y -20,7 mV, lo que indica una buena estabilidad (Zuorro et al., 2022). Por otro lado, la presencia de compuestos fenólicos, en particular los ácidos cafeoilquínicos, mejora las propiedades antioxidantes de las nanopartículas, lo que contribuye a su estabilidad y a sus posibles aplicaciones en diversos campos (Yust et al., 2022). Además, se ha demostrado que el uso de extractos de hojas de café arábica, que son ricos en ácido 5-cafeoilquínico (5-CQA), producen AgNPs altamente estables, pues este compuesto actúa como agente de protección, proporcionando estabilidad y permitiendo que las nanopartículas se utilicen en aplicaciones de detección sensibles, como la detección de L-cisteína, debido a su afinidad por los grupos tiol (Harsha Haridas et al., 2023). Esto pone de manifiesto la versatilidad de los compuestos bioactivos derivados del café a la hora de mejorar las propiedades funcionales de las AgNPs. En general, los compuestos bioactivos de los extractos de residuos del café, en particular los ácidos fenólicos y cafeoilquínicos, desempeñan un papel crucial en la síntesis ecológica de las AgNPs al influir en su morfología y estabilidad, facilitando no solo la reducción y la estabilización de las nanopartículas, sino que también mejora sus propiedades funcionales, lo que las hace adecuadas para diversas aplicaciones, incluidas las actividades biodetectoras y antimicrobianas (Harsha Haridas et al., 2023).

Residuos de pasifloras.

La síntesis de AgNPs utilizando extracto de hoja de maracuyá (*Passiflora edulis*) ha permitido obtener nanopartículas estables y no tóxicas, debido a que los compuestos bioactivos presentes en el extracto actúan como agentes reductores y estabilizantes, como lo evidencia el análisis FTIR (Duraiyaran et al., 2024). Las micrográficas SEM muestran que las AgNPs sintetizadas presentan una morfología predominantemente esférica, y los difractogramas de XRD confirman su estructura cristalina (Duraiyaran et al., 2024). Estos resultados subrayan el potencial de los extractos de *Passiflora* para la síntesis de nanopartículas con propiedades controladas. De manera similar, los extractos de *Passiflora foetida* han demostrado ser versátiles en la síntesis de AgNPs, debido a que su capacidad de formar ligandos de recubrimiento, que influyen en la morfología y estabilidad de las nanopartículas, está determinada por la presencia de alcanos, grupos aromáticos y compuestos nitro en estos extractos. Estas nanopartículas exhiben una variedad de formas, incluyendo esféricas y hexagonales, con tamaños que van de 40 nm a 100 nm, como lo muestran los estudios de TEM (Palanisamy et al., 2024). La concentración del extracto y las condiciones de síntesis, como la exposición a la luz solar o la temperatura ambiente, influyen significativamente en el tamaño y la forma de las nanopartículas, como lo demuestran los cambios en la resonancia plasmónica superficial (Lade & Patil, 2022; Palanisamy et al., 2024). Además, el análisis FTIR ha identificado grupos funcionales como alcanos, aminas y ácidos carboxílicos como agentes reductores clave, contribuyendo a la estabilidad y actividad antimicrobiana de las AgNPs (Lade & Patil, 2022). Estos resultados subrayan el potencial de los compuestos bioactivos en los extractos de *Passiflora* para la síntesis de nanopartículas con propiedades controladas y aplicaciones biomédicas.

Residuos de viticultura.

Los residuos de uva han demostrado ser una fuente rica en compuestos bioactivos capaces de sintetizar AgNPs con propiedades únicas. Estudios recientes han revelado que compuestos como el ácido oleanólico y los compuestos fenólicos actúan como agentes reductores y estabilizantes, influyendo en el tamaño, forma y estabilidad de las nanopartículas (Baroi et al., 2024; De La Cruz-Puma et al., 2024; Miškovská et al., 2024a; Quynh et al., 2024). Por ejemplo, la cáscara de *Vitis heyneana* ha sido utilizada para sintetizar AgNPs cuasi-esféricas con propiedades antimicrobianas y antioxidantes significativas (Quynh et al., 2024). Asimismo, los extractos de orujo de uva han permitido obtener AgNPs con tamaños de cristal pequeños y propiedades

antioxidantes y antimicrobianas mejoradas (Baroi et al., 2024). Incluso los tallos de uva han sido utilizados para sintetizar AgNPs estables, donde las condiciones de reacción influyen en la morfología y estabilidad de las nanopartículas (De La Cruz-Puma et al., 2024). Además, el extracto etanólico de residuos de poda de *Vitis vinifera* ha dado lugar a AgNPs con una estabilidad excepcional a largo plazo (Miškovská et al., 2024a). Estos resultados subrayan el potencial de los residuos de uva como una fuente sostenible de compuestos bioactivos para la síntesis de AgNPs con propiedades controladas y aplicaciones biomédicas.

Tabla 1.

Características de las AgNPs obtenidas mediante Reducción biogénica utilizando distintos residuos agroindustriales.

Residuo agroindustrial	Componente Bioactivo principal	Estabilidad	Tamaño de las AgNPs (nm)	Aplicaciones	Referencia
Cáscaras de cacao	Compuestos fenólicos y flavonoides	Potencial zeta de -0.93 mV (estabilidad moderada)	6-18	Antimicrobiano	(Efavi et al., 2022; Thatikayala et al., 2019; Belwal et al., 2022)
Residuos de café	Ácidos cafeoilquínicos, compuestos fenólicos	Potencial zeta de -30.5 a -20.7 mV (buena estabilidad)	10	Biosensores, antimicrobianos	(Zuorro et al., 2022; Yust et al., 2022; Haridas et al., 2023)
Residuos de pasifloras	Alcanos, grupos aromáticos, compuestos nitro	Potencial zeta de -1.93 mV (estabilidad moderada)	40 a 100	Biosensores, propiedades antimicrobianas	(Duraiyaran, P., et al, 2024; Palanisamy, D. S., et al, 2023; Lade, B., & Patil, A., 2022)
Residuos de viticultura	Ácido oleanólico, compuestos fenólicos	Potencial zeta de -28.5 a -20.7 mV (buena estabilidad)	4 a 11	Estabilidad excepcional mantenida por hasta un año, eficacia antimicrobiana y biocompatibilidad	(Quynh, P. H., et al, 2024; Quynh, P. H., et al, 2024; Rosa, M., et al, 2024; Miškovská, A., et al, 2024)

Nota: Elaboración propia.

Caracterización de las AgNPs sintetizadas

Las AgNPs se caracterizan utilizando una variedad de técnicas para comprender sus propiedades estructurales, morfológicas y ópticas, siendo cruciales para determinar el tamaño, la forma y la composición de las nanopartículas, lo que a su vez influye en sus aplicaciones en diversos campos. La Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM) se utiliza con frecuencia para determinar el tamaño y la morfología de las AgNPs, midiendo el tamaño promedio de las partículas de AgNPs sintetizadas mediante un método electroquímico, revelando tamaños que varían de 3.27 nm a 4.23 nm dependiendo de la concentración (Jaimez Layna et al., 2024). De manera similar, el análisis TEM de AgNPs modificadas con lignina mostró tamaños medianos entre 12 y 15 nm, lo que indica alta uniformidad y circularidad (Maršík et al., 2024). La difracción de rayos X (XRD) es otra técnica comúnmente utilizada para analizar la estructura cristalina de las AgNPs, pues los patrones de XRD pueden confirmar la presencia de plata metálica al identificar picos característicos, como los observados a 38.11° y 64.42° en las AgNPs sintetizadas electroquímicamente (Jaimez Layna et al., 2024). La XRD también reveló la estructura cúbica de las AgNPs modificadas con lignina, con información adicional sobre el enlace Ag-O (Maršík et al., 2024). La espectroscopía UV-Vis se utiliza para estudiar las propiedades ópticas de las AgNPs, particularmente su resonancia de plasmón superficial (SPR), que identificó picos de absorción entre 422 nm y 429 nm para las AgNPs, lo que indica sus características ópticas (Jaimez Layna et al., 2024). Además, la SPR es una característica crítica que influye en las aplicaciones de las nanopartículas en detección y catálisis (Khalid et al., 2024). Otras técnicas que se emplean para una mayor caracterización son la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), en donde, FTIR ayuda a comprender las interacciones químicas y los grupos funcionales presentes en la superficie de la nanopartícula, como se observó en las AgNPs sintetizadas utilizando extracto de *Mentha spicata L.*, y SEM proporciona detalles morfológicos adicionales que complementan los hallazgos de TEM (Khalid et al., 2024; Tosun & Özgür, 2024). Estos métodos de caracterización proporcionan colectivamente una comprensión integral de las AgNPs, permitiendo su aplicación personalizada en campos como la medicina, la electrónica y la ciencia ambiental (Tosun & Özgür, 2024). La integración de estas técnicas asegura un análisis robusto de las AgNPs, facilitando su uso efectivo en diversos dominios tecnológicos.

Aplicaciones de las AgNPs sintetizadas a partir de residuos agroindustriales

La síntesis de AgNPs a partir de residuos agrícolas y agroindustriales representa una estrategia sostenible y versátil con amplias aplicaciones en los sectores biomédico y ambiental. Por ejemplo, las AgNPs derivadas de la cáscara de *Pithecellobium dulce* han demostrado poseer potentes propiedades antibacterianas, antioxidantes y anticancerígenas (Suriyakala et al., 2024). De manera similar, las AgNPs sintetizadas a partir de *Pittosporum undulatum* han mostrado eficacia contra bacterias y larvas de mosquitos, además de ser biocompatibles (Narayanan et al., 2024). En el ámbito vitivinícola, las AgNPs derivadas de residuos han demostrado ser agentes antimicrobianos efectivos y biocompatibles (Miškovská et al., 2024b).

Más allá de las aplicaciones biomédicas, las AgNPs sintetizadas a partir de residuos agroindustriales han mostrado un gran potencial en el tratamiento de aguas residuales ya que su capacidad catalítica facilita la degradación de colorantes orgánicos, abordando un problema ambiental relevante (Rani et al., 2024). Además, estas nanopartículas han sido incorporadas en compuestos de celulosa para mejorar las propiedades térmicas y mecánicas de dispositivos electrónicos, ampliando así sus aplicaciones (Devarajan et al., 2024).

En resumen, la síntesis verde de AgNPs a partir de residuos agroindustriales ofrece una alternativa sostenible y eficiente para obtener nanopartículas multifuncionales con aplicaciones prometedoras en diversos campos, desde la salud hasta el medio ambiente y la electrónica.

Desafíos y perspectivas futuras

La síntesis de AgNPs utilizando residuos agroindustriales presenta tanto desafíos como perspectivas futuras prometedoras, siendo este enfoque, parte de una tendencia más amplia hacia la producción sostenible y ecológica de nanopartículas, aprovechando la abundancia y el bajo costo de materiales de desecho agrícola como tallos, hojas, semillas y bagazo (Bartolucci et al., 2020; Flores-Contreras et al., 2024b). La síntesis verde de AgNPs a través de métodos mediados por plantas se destaca por su simplicidad y su reducido impacto ambiental en comparación con los métodos químicos convencionales. Uno de los principales desafíos en el uso de residuos agroindustriales para la síntesis de AgNPs es la variabilidad en la composición del material crudo, lo cual puede afectar la consistencia y calidad de las nanopartículas producidas, dado que

esta variabilidad requiere de un control cuidadoso de los parámetros de síntesis, como la temperatura, el pH y las concentraciones de reactivos, para lograr las propiedades deseadas de las nanopartículas (Flores-Contreras et al., 2024b; Mülhopt et al., 2018; Pantoja & Coral, 2018; Souto et al., 2020). Además, es necesario abordar problemas relacionados con la homogeneización y el rendimiento de las nanopartículas, así como su posible toxicidad, para asegurar una aplicación segura, especialmente en áreas sensibles como la conservación de alimentos. A pesar de estos desafíos, el uso de residuos agroindustriales para la síntesis de AgNPs ofrece beneficios significativos, como el bajo consumo de energía y la rentabilidad, además de que las nanopartículas resultantes exhiben propiedades valiosas, como la actividad antimicrobiana, que pueden aprovecharse en aplicaciones como la conservación de alimentos y la acuicultura, donde ayudan a manejar infecciones patógenas y mejorar la calidad del agua (Hernández-Díaz et al., 2021; Sánchez-López, Gomes, Esteruelas, Bonilla, López-Machado, et al., 2020; Torres-Giner et al., 2020). La investigación futura debe centrarse en optimizar los métodos de síntesis para mejorar la estabilidad y funcionalidad de las AgNPs, así como en desarrollar protocolos de seguridad integrales para mitigar los posibles riesgos para la salud humana y el medio ambiente. En conclusión, aunque la síntesis de AgNPs a partir de residuos agroindustriales enfrenta desafíos relacionados con la variabilidad del material y la seguridad, tiene un considerable potencial para la producción sostenible de nanopartículas, por lo que la continua investigación y desarrollo en esta área podría conducir a aplicaciones más amplias y a la mejora de los estándares de seguridad, desbloqueando todo el potencial de las AgNPs en diversas industrias.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen intereses financieros en competencia ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este documento en este artículo.

Agradecimientos

Los autores brindan su continuo reconocimiento y agradecimiento al Sistema de Investigación, Innovación y Desarrollo Tecnológico del SENA, SENNOVA, por financiar este artículo de investigación mediante el proyecto SGPS-12425-2024.

Referencias bibliográficas

- Alarcón, H., Tolmos, M., Villacrés, N., & Huarote, E. (2021). Química verde-Una alternativa eco-amigable en la obtención de nanopartículas de Ag0. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 87(3), 298-306. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v87i3.354>
- Ali, Md. A., Ahmed, T., Wu, W., Hossain, A., Hafeez, R., Islam Masum, Md. M., Wang, Y., An, Q., Sun, G., & Li, B. (2020). Advancements in Plant and Microbe-Based Synthesis of Metallic Nanoparticles and Their Antimicrobial Activity against Plant Pathogens. *Nanomaterials*, 10(6), 1146. <https://doi.org/10.3390/nano10061146>
- Andreani, T., Nogueira, V., Pinto, V. V., Ferreira, M. J., Rasteiro, M. G., Silva, A. M., Pereira, R., & Pereira, C. M. (2017). Influence of the stabilizers on the toxicity of metallic nanomaterials in aquatic organisms and human cell lines. *Science of The Total Environment*, 607–608, 1264–1277. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.098>
- Backx, B. P., dos Santos, M. S., dos Santos, O. A. L., & Filho, S. A. (2021). The Role of Biosynthesized Silver Nanoparticles in Antimicrobial Mechanisms. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 22(6), 762–772. <https://doi.org/10.2174/1389201022666210202143755>
- Banerjee, K., & Ravishankar Rai, V. (2022). Silver nanoparticles synthesis mechanisms. En *Green Synthesis of Silver Nanomaterials* (pp. 607–625). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824508-8.00025-3>
- Baroi, A. M., Fierascu, I., Ghizdareanu, A.-I., Trica, B., Fistos, T., Matei (Brazdis), R. I., Fierascu, R. C., Firinca, C., Sardaescu, I. D., & Avramescu, S. M. (2024). Green Approach for Synthesis of Silver Nanoparticles with Antimicrobial and Antioxidant Properties from Grapevine Waste Extracts. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(8), 4212. <https://doi.org/10.3390/ijms25084212>
- Bartolucci, C., Antonacci, A., Arduini, F., Moscone, D., Fraceto, L., Campos, E., Attaallah, R., Amine, A., Zanardi, C., Cubillana-Aguilera, L. M., Palacios Santander, J. M., & Scognamiglio, V. (2020). Green nanomaterials fostering agrifood sustainability. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 125, 115840. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.115840>
- Bastos-Arrieta, J., Florido, A., Pérez-Ràfols, C., Serrano, N., Fiol, N., Poch, J., & Villaescusa, I. (2018). Green Synthesis of Ag Nanoparticles Using Grape Stalk Waste Extract for the Modification of Screen-Printed Electrodes. *Nanomaterials*, 8(11), 946. <https://doi.org/10.3390/nano8110946>

- Belwal, T., Cravotto, C., Ramola, S., Thakur, M., Chemat, F., & Cravotto, G. (2022). Bioactive Compounds from Cocoa Husk: Extraction, Analysis and Applications in Food Production Chain. *Foods*, 11(6), 798. <https://doi.org/10.3390/foods11060798>
- Beyene, H. D., Werkneh, A. A., Bezabh, H. K., & Ambaye, T. G. (2017). Synthesis paradigm and applications of silver nanoparticles (AgNPs), a review. *Sustainable Materials and Technologies*, 13, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2017.08.001>
- Burdușel, A.-C., Gherasim, O., Grumezescu, A. M., Mogoantă, L., Ficai, A., & Andronescu, E. (2018). Biomedical Applications of Silver Nanoparticles: An Up-to-Date Overview. *Nanomaterials*, 8(9), 681. <https://doi.org/10.3390/nano8090681>
- Calderón-Jiménez, B., Johnson, M. E., Montoro Bustos, A. R., Murphy, K. E., Winchester, M. R., & Vega Baudrit, J. R. (2017). Silver Nanoparticles: Technological Advances, Societal Impacts, and Metrological Challenges. *Frontiers in Chemistry*, 5. <https://doi.org/10.3389/fchem.2017.00006>
- Chung, I.-M., Park, I., Seung-Hyun, K., Thiruvengadam, M., & Rajakumar, G. (2016). Plant-Mediated Synthesis of Silver Nanoparticles: Their Characteristic Properties and Therapeutic Applications. *Nanoscale Research Letters*, 11(1), 40. <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1257-4>
- Consolo, V. F., Torres-Nicolini, A., & Alvarez, V. A. (2020). Mycosynthetized Ag, CuO and ZnO nanoparticles from a promising *Trichoderma harzianum* strain and their antifungal potential against important phytopathogens. *Scientific Reports 2020 10:1*, 10(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77294-6>
- De La Cruz-Puma, R. M., Vega-Chacón, J., Raúl Jauja-Ccana, V., Villa, J. E. L., & La Rosa-Toro, A. (2024). Green synthesis and characterization of silver nanoparticles using grape stalk extract. *Journal of Molecular Liquids*, 403, 124927. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.124927>
- Devarajan, M. M., Kumaraguruparan, G., Nagarajan, K. J., & Vignesh, C. (2024). Production of hybrid AgNPs - TEMPO-mediated oxidation cellulose composite from jackfruit peduncle agro-waste and its thermal management application in electronic devices. *International Journal of Biological Macromolecules*, 254, 127848. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127848>
- Duraiyaran, P., Subramaniam, P., Melvin, A., Siva, G., Venkatesh, S., & Rafi, K. M. (2024). Facile Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using *Passiflora edulis* and Its Efficacy Against the Breast Cancer Cell Line. En *Biotechnology of Medicinal Plants with Antiallergy Properties* (pp. 251–264). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1467-4_9

- Efavi, J. K., Nyankson, E., Kyeremeh, K., Manu, G. P., Asare, K., & Yeboah, N. (2022). Monodispersed AgNPs Synthesized from the Nanofactories of *Theobroma cacao* (Cocoa) Leaves and Pod Husk and Their Antimicrobial Activity. *International Journal of Biomaterials*, 2022, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2022/4106558>
- Flores-Contreras, E. A., González-González, R. B., Pablo Pizaña-Aranda, J. J., Parra-Arroyo, L., Rodríguez-Aguayo, A. A., Iñiguez-Moreno, M., González-Meza, G. M., Araújo, R. G., Ramírez-Gamboa, D., Parra-Saldívar, R., & Melchor-Martínez, E. M. (2024a). Agricultural waste as a sustainable source for nanoparticle synthesis and their antimicrobial properties for food preservation. *Frontiers in Nanotechnology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fnano.2024.1346069>
- Flores-Contreras, E. A., González-González, R. B., Pablo Pizaña-Aranda, J. J., Parra-Arroyo, L., Rodríguez-Aguayo, A. A., Iñiguez-Moreno, M., González-Meza, G. M., Araújo, R. G., Ramírez-Gamboa, D., Parra-Saldívar, R., & Melchor-Martínez, E. M. (2024b). Agricultural waste as a sustainable source for nanoparticle synthesis and their antimicrobial properties for food preservation. *Frontiers in Nanotechnology*, 6, 1346069. <https://doi.org/10.3389/FNANO.2024.1346069/BIBTEX>
- Gómez, D., Investigación, M. G.-E. S. De, & 2020, undefined. (2020). Los cultivos agrícolas en el Huila: Análisis de cambios y tendencias. *journalusco.edu.co*, 5(1), 89–103. <https://www.journalusco.edu.co/index.php/erasmus/article/view/2489>
- González-Conde, M., Vega, J., López-Figueroa, F., García-Castro, M., Moscoso, A., Sarabia, F., & López-Romero, J. M. (2023). Green Synthesis of Silver Nanoparticles and Its Combination with *Pyropia columbina* (Rhodophyta) Extracts for a Cosmeceutical Application. *Nanomaterials*, 13(6), 1010. <https://doi.org/10.3390/nano13061010>
- Harsha Haridas, E. S., Bhattacharya, S., Varma, M. K. R., & Chandra, G. K. (2023). Bioinspired 5-caffeoylquinic acid capped silver nanoparticles using Coffee arabica leaf extract for high-sensitive cysteine detection. *Scientific Reports*, 13(1), 8651. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34944-9>
- Hernández-Díaz, J. A., Garza-García, J. J. O., Zamudio-Ojeda, A., León-Morales, J. M., López-Velázquez, J. C., & García-Morales, S. (2021). Plant-mediated synthesis of nanoparticles and their antimicrobial activity against phytopathogens. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(4), 1270–1287. <https://doi.org/10.1002/JSFA.10767>
- Jaimez Layna, G., Mejía García, C., Díaz Valdés, E., Guillén Cervantes, Á., Rojas Morales, M. de L., Avendaño Ibarra, M., Bautista Ramírez, M. E., & Lozano Rojas, K. J. (2024). Synthesis and characterization of silver nanoparticles by electrochemical

- method. *Materials Express*, 14(7), 1072–1077. <https://doi.org/10.1166/mex.2024.2715>
- Jorge de Souza, T. A., Rosa Souza, L. R., & Franchi, L. P. (2019). Silver nanoparticles: An integrated view of green synthesis methods, transformation in the environment, and toxicity. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 171, 691–700. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.12.095>
- Keijok, W. J., Pereira, R. H. A., Alvarez, L. A. C., Prado, A. R., da Silva, A. R., Ribeiro, J., de Oliveira, J. P., & Guimarães, M. C. C. (2019). Controlled biosynthesis of gold nanoparticles with *Coffea arabica* using factorial design. *Scientific Reports 2019* 9:1, 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52496-9>
- Khalid, Z., Javed, A., Alyas, T., Shaheen, S., Nazish, M., Khalid, R., Obaid, S. Al, Ansari, M. J., & Kamal, A. (2024). Biosynthesis, structural characterization of silver nanoparticles synthesized using an eco-friendly method with *Mentha spicata* L. extract and their antimicrobial activity and toxicological risk assessment. *Results in Chemistry*, 7, 101487. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101487>
- Khan, F., Shariq, M., Asif, M., Siddiqui, M. A., Malan, P., & Ahmad, F. (2022). Green Nanotechnology: Plant-Mediated Nanoparticle Synthesis and Application. *Nanomaterials*, 12(4), 673. <https://doi.org/10.3390/nano12040673>
- Lade, B., & Patil, A. (2022). Green Synthesis and Characterization of Silver Nanoparticles Synthesized Using Leaf Extract of *Passiflora Foetida* Linn. *Journal of Sustainable Materials Processing and Management*, 2(2). <https://doi.org/10.30880/jsmpm.2022.02.02.008>
- Maršík, D., Thoresen, P. P., Maťátková, O., Masák, J., Sialini, P., Rova, U., Tsikourkitoudi, V., Christakopoulos, P., Matsakas, L., & Jarošová Kolouchová, I. (2024). Synthesis and Characterization of Lignin-Silver Nanoparticles. *Molecules*, 29(10), 2360. <https://doi.org/10.3390/molecules29102360>
- Miškovská, A., Michailidu, J., Kolouchová, I. J., Barone, L., Gornati, R., Montali, A., Tettamanti, G., Berini, F., Marinelli, F., Masák, J., Čejková, A., & Maťátková, O. (2024a). Biological activity of silver nanoparticles synthesized using viticultural waste. *Microbial Pathogenesis*, 190, 106613. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2024.106613>
- Miškovská, A., Michailidu, J., Kolouchová, I. J., Barone, L., Gornati, R., Montali, A., Tettamanti, G., Berini, F., Marinelli, F., Masák, J., Čejková, A., & Maťátková, O. (2024b). Biological activity of silver nanoparticles synthesized using viticultural waste. *Microbial Pathogenesis*, 190, 106613. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2024.106613>

- Mülhopt, S., Diabaté, S., Dilger, M., Adelhelm, C., Anderlohr, C., Bergfeldt, T., de la Torre, J. G., Jiang, Y., Valsami-Jones, E., Langevin, D., Lynch, I., Mahon, E., Nelissen, I., Piella, J., Puentes, V., Ray, S., Schneider, R., Wilkins, T., Weiss, C., & Paur, H. R. (2018). Characterization of Nanoparticle Batch-To-Batch Variability. *Nanomaterials* 2018, Vol. 8, Page 311, 8(5), 311. <https://doi.org/10.3390/NANO8050311>
- Narayanan, M., Alshiekheid, M. A., & Saravanan, M. (2024). Antibacterial, mosquito larvicidal, and cytotoxicity potential of AgNPs synthesized using *Pittosporum undulatum* under in vitro conditions. *Environmental Research*, 260, 119585. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119585>
- Odongo, S. A., Lugasi, S. O., Okumu, F. O., Onani, M. O., Lagat, S. C., & Agong, S. G. (2022). Biogenically Synthesized Silver/Gold Nanoparticles, Mechanism and their Applications: A Review. *Asian Journal of Chemical Sciences*, 1–18. <https://doi.org/10.9734/ajocs/2022/v11i219116>
- Pal, G., Rai, P., & Pandey, A. (2019). Green synthesis of nanoparticles: A greener approach for a cleaner future. En *Green Synthesis, Characterization and Applications of Nanoparticles* (pp. 1–26). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102579-6.00001-0>
- Palanisamy, D. S., Gounder, B. S., Selvaraj, K., Kandhasamy, S., Alqahtani, T., Alqahtani, A., Chidambaram, K., Arunachalam, K., Alkahtani, A. M., Chandramoorthy, H. C., Sharma, N., Rajeshkumar, S., & Marwaha, L. (2024). Synergistic antibacterial and mosquitocidal effect of *Passiflora foetida* synthesized silver nanoparticles. *Brazilian Journal of Biology*, 84. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.263391>
- Pantoja, K. A. T., & Coral, D. F. (2018). Temperature Controller for a Nanoparticle Synthesis System. *2018 IEEE ANDESCON, ANDESCON 2018 - Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ANDESCON.2018.8564577>
- Parveen, K., Banse, V., & Ledwani, L. (2016). *Green synthesis of nanoparticles: Their advantages and disadvantages*. 020048. <https://doi.org/10.1063/1.4945168>
- Peralta-Videa, J. R., Huang, Y., Parsons, J. G., Zhao, L., López-Moreno, L., Hernández-Viezas, J. A., & Gardea-Torresdey, J. L. (2016). Plant-based green synthesis of metallic nanoparticles: scientific curiosity or a realistic alternative to chemical synthesis? *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 1(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s41204-016-0004-5>
- Quynh, P. H., Ninh, T. T. T., Tinh, N. Q., Van Thu, N., Van Thanh, D., Nguyen, D. D., Thanh Hai, C., & Tam, K. T. (2024). *Vitis heyneana* extract mediated synthesis of silver nanoparticles with high bioactive and colorimetric sensing properties. *Materials Research Express*, 11(7), 075002. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad5c2f>

- Rajakumar, G., Sudha, P. N., & Thiruvengadam, M. (2023). Synthesis, Bioactivity Evaluation and Application of Plant-Based Nanoparticles. *Molecules*, 28(12), 4783. <https://doi.org/10.3390/molecules28124783>
- Rani, G., Bala, A., Ahlawat, R., Nunach, A., & Chahar, S. (2024). Recent Advances in Synthesis of AgNPs and Their Role in Degradation of Organic Dyes. *Comments on Inorganic Chemistry*, 1–29. <https://doi.org/10.1080/02603594.2024.2312394>
- Sánchez-López, E., Gomes, D., Esteruelas, G., Bonilla, L., Laura López-Machado, A., Galindo, R., Cano, A., Espina, M., Ettcheto, M., Camins, A., Silva, A. M., Durazzo, A., Santini, A., García, M. L., & Souto, E. B. (2020). Metal-based nanoparticles as antimicrobial agents: an overview. *mdpi.com* E Sánchez-López, D Gómez, G Esteruelas, L Bonilla, AL López-Machado, R Galindo *Nanomaterials*, 2020•*mdpi.com*, 10, 292. <https://doi.org/10.3390/nano10020292>
- Sánchez-López, E., Gomes, D., Esteruelas, G., Bonilla, L., López-Machado, A. L., Galindo, R., Cano, A., Espina, M., Ettcheto, M., Camins, A., Silva, A. M., Durazzo, A., Santini, A., García, M. L., & Souto, E. B. (2020). Metal-Based Nanoparticles as Antimicrobial Agents: An Overview. *Nanomaterials 2020, Vol. 10, Page 292, 10(2)*, 292. <https://doi.org/10.3390/NANO10020292>
- Silva, L. P., Pereira, T. M., & Bonatto, C. C. (2019). Frontiers and perspectives in the green synthesis of silver nanoparticles. En *Green Synthesis, Characterization and Applications of Nanoparticles* (pp. 137–164). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102579-6.00007-1>
- Silveira, R., Angioletto, E., Arcaro, S., & Gomes, T. (2022). Nanopartículas de prata: síntese, atividade antibacteriana e comparativo com um desinfetante comum. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 19, e2638. <https://doi.org/10.4322/2176-1523.20222638/PDF/TMM-19-E2638.PDF>
- Singh, P., Kim, Y.-J., Zhang, D., & Yang, D.-C. (2016). Biological Synthesis of Nanoparticles from Plants and Microorganisms. *Trends in Biotechnology*, 34(7), 588–599. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2016.02.006>
- Souto, E. B., Silva, G. F., Dias-ferreira, J., Zielinska, A., Ventura, F., Durazzo, A., Lucarini, M., Novellino, E., & Santini, A. (2020). Nanopharmaceutics: Part II—Production Scales and Clinically Compliant Production Methods. *Nanomaterials 2020, Vol. 10, Page 455, 10(3)*, 455. <https://doi.org/10.3390/NANO10030455>
- Suriyakala, G., Sathiyaraj, S., Paranthaman, U. G., Velmurugan, R., Jayashan, S. S., Babujanarthanam, R., Tungphatthong, C., & Sukrong, S. (2024). Agro-waste mediated silver nanoparticles from *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth

- fruit peel and their multifaceted biomedical applications. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 38, 101189. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101189>
- Syafiuddin, A., Salmiati, Salim, M. R., Beng Hong Kueh, A., Hadibarata, T., & Nur, H. (2017). A Review of Silver Nanoparticles: Research Trends, Global Consumption, Synthesis, Properties, and Future Challenges. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 64(7), 732–756. <https://doi.org/10.1002/jccs.201700067>
- Thatikayala, D., Jayarambabu, N., Banothu, V., Ballipalli, C. B., Park, J., & Rao, K. V. (2019). Biogenic synthesis of silver nanoparticles mediated by Theobroma cacao extract: enhanced antibacterial and photocatalytic activities. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30(18), 17303–17313. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-02077-3>
- Thirumurugan, G., Dhanaraju, M. D., Thirumurugan, G., & Dhanaraju, M. D. (2012). Silver Nanoparticles: Real Antibacterial Bullets. *Antimicrobial Agents*. <https://doi.org/10.5772/32450>
- Torres-Giner, S., Prieto, C., & Lagaron, J. M. (2020). Nanomaterials to Enhance Food Quality, Safety, and Health Impact. *Nanomaterials 2020, Vol. 10, Page 941, 10(5)*, 941. <https://doi.org/10.3390/NANO10050941>
- Tortella, G. R., Rubilar, O., Durán, N., Diez, M. C., Martínez, M., Parada, J., & Seabra, A. B. (2020). Silver nanoparticles: Toxicity in model organisms as an overview of its hazard for human health and the environment. *Journal of Hazardous Materials*, 390, 121974. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121974>
- Tosun, N. G., & Özgür, A. (2024). Synthesis methods and characterization parameters of silver nanoparticles. En *Silver Nanoparticles for Drug Delivery* (pp. 39–65). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15343-3.00005-X>
- Verma, A., Gautam, S. P., Bansal, K. K., Prabhakar, N., & Rosenholm, J. M. (2019). Green Nanotechnology: Advancement in Phytoformulation Research. *Medicines*, 6(1), 39. <https://doi.org/10.3390/medicines6010039>
- Virkutyte, J., & Varma, R. S. (2013). *Green Synthesis of Nanomaterials: Environmental Aspects* (pp. 11–39). <https://doi.org/10.1021/bk-2013-1124.ch002>
- Wei, S., Hao, M., Tang, Z., Zhou, T., Zhao, F., & Wang, Y. (2022). Non-medicinal parts of safflower (bud and stem) mediated sustainable green synthesis of silver nanoparticles under ultrasonication: optimization, characterization, antioxidant, antibacterial and anticancer potential. *RSC Advances*, 12(55), 36115–36125. <https://doi.org/10.1039/D2RA06414F>
- Yadav, J., & Tare, H. (2024). Silver Nanoparticles as Antimicrobial Agents: Mechanisms, Challenges, and Applications. *INTERNATIONAL JOURNAL OF*

PHARMACEUTICAL QUALITY ASSURANCE, 15(01), 546–553. <https://doi.org/10.25258/ijpqa.15.1.82>

Yust, B. G., Rao, N. Z., Schwarzmann, E. T., & Peoples, M. H. (2022). Quantification of Spent Coffee Ground Extracts by Roast and Brew Method, and Their Utility in a Green Synthesis of Gold and Silver Nanoparticles. *Molecules*, 27(16), 5124.

<https://doi.org/10.3390/molecules27165124>

Zhang, X.-F., Liu, Z.-G., Shen, W., & Gurunathan, S. (2016). Silver Nanoparticles: Synthesis, Characterization, Properties, Applications, and Therapeutic Approaches. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(9), 1534.

<https://doi.org/10.3390/ijms17091534>

Zuorro, A., Iannone, A., Miglietta, S., & Lavecchia, R. (2022). Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using Spent Coffee Ground Extracts: Process Modelling and Optimization. *Nanomaterials*, 12(15), 2597.

<https://doi.org/10.3390/nano12152597>