

Valorización de Garambullo en Síntesis Verde de Nanopartículas de Plata: Efecto de la Complejidad Fitoquímica y Capacidad Antioxidante Frente a Quercetina

Valorization of Garambullo in Green Synthesis of Silver Nanoparticles: Phytochemical Complexity Effect and Antioxidant Capacity Against Quercetin

López-Cortés M. G.^{1*}, Pérez-Pérez M. C. I.¹, González-Calderón J. A.², Teniente-Martínez G.³, Herrera-Pérez S.¹, Almanza-Rangel, S.¹

¹ Departamento de Ingeniería Bioquímica y Ambiental; Tecnológico Nacional de México en Celaya; 38010, Celaya, Guanajuato

² Cátedras CONACYT-Instituto de Física; Universidad Autónoma de San Luis Potosí; 78000, San Luis Potosí, San Luis Potosí

³ Departamento de Licenciatura en Ingeniería en Biotecnología y Licenciatura en Ingeniería en Alimentos; Universidad Politécnica de Guanajuato; 38496, Cortázar, Guanajuato

d2403004@itcelaya.edu.mx

ABSTRACT

The potential of garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*) as a reducing and stabilizing agent in the green synthesis of silver nanoparticles (AgNPs) was evaluated in comparison with commercial and reagent-grade quercetin. The extract exhibited a phenolic compound content of 60.893 mg GAE/100 g, higher than in previous reports, as reflected in high antioxidant capacities (1559.11 μ M TE/100 g by ABTS and 1016.50 μ M TE/100 g by DPPH). AgNPs formation was confirmed by UV-Vis spectroscopy, revealing a characteristic plasmon around 430 nm, as well as a color change indicative of Ag⁺ reduction. Systems with garambullo showed greater colloidal stability over time, while systems with quercetin showed a greater tendency to agglomerate. In the antimicrobial evaluation, AgNPs synthesized from garambullo showed greater activity against *Staphylococcus aureus*, with inhibition zones up to 26.23 $\pm$ 0.25 mm, while inhibition against *Escherichia coli* was lower (14.49 $\pm$ 0.45 mm), attributed to its cellular structure. These results demonstrate that the phytochemical complexity of garambullo favors both the synthesis and stability of AgNPs, highlighting its potential as a sustainable alternative for applications in the food sector.

Keywords: Antimicrobial activity, antioxidant capacity, green synthesis, garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*), silver nanoparticles.

RESUMEN

Se evaluó el potencial del garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*) como agente reductor y estabilizante en la síntesis verde de nanopartículas de plata (AgNPs), en comparación con quercetina comercial y de grado reactivo. El extracto presentó un contenido de compuestos fenólicos de 60.893 mg GAE/100 g, superior a reportes previos, lo que se reflejó en una elevada capacidad antioxidante (1559.11 μ M TE/100 g por ABTS y 1016.50 μ M TE/100 g por DPPH). La formación de AgNPs se confirmó mediante espectroscopía UV-Vis, observándose un plasmón característico alrededor de 430 nm, así como un cambio de color indicativo de la reducción de Ag⁺. Los sistemas con garambullo mostraron mayor estabilidad coloidal en el tiempo, mientras que los sistemas con quercetina, evidenciaron mayor tendencia a la aglomeración. En la evaluación antimicrobiana, las AgNPs sintetizadas con garambullo presentaron mayor actividad frente a *Staphylococcus aureus* ATCC-6538, con halos de inhibición de hasta 26.23 $\pm$ 0.25 mm, mientras que en *Escherichia coli* ATCC-25922 la inhibición fue menor, 14.49 $\pm$ 0.45 mm, atribuida a su estructura celular. Estos resultados evidencian que la complejidad fitoquímica del garambullo favorece tanto la síntesis como la estabilidad de las AgNPs, lo que destaca su potencial como alternativa sustentable para aplicaciones en el sector alimentario.

Palabras Clave: Actividad antimicrobiana, capacidad antioxidante, garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*), nanopartículas de plata, síntesis verde.

INTRODUCCIÓN

Las nanopartículas de plata (AgNPs) han sido ampliamente estudiadas debido a sus propiedades fisicoquímicas y biológicas distintivas, asociadas a su tamaño nanométrico (1–100 nm), alta relación superficie-volumen y capacidad de liberar iones Ag^+ , lo que les confiere una notable actividad antimicrobiana y aplicaciones potenciales en sectores biomédicos, alimentarios y ambientales (Parmar *et al.*, 2022; Shahzadi *et al.*, 2025). Tradicionalmente, la síntesis de AgNPs se ha llevado a cabo mediante métodos físico-químicos que, si bien permiten un control adecuado del tamaño y morfología, presentan desventajas asociadas al alto consumo energético y al uso de reactivos potencialmente tóxicos.

En este contexto, la síntesis verde ha emergido como una alternativa sustentable basada en el uso de extractos biológicos ricos en metabolitos secundarios capaces de actuar como agentes reductores y estabilizantes (Huq *et al.*, 2022 y Abada *et al.*, 2024). Entre estos compuestos, los polifenoles, flavonoides y otros antioxidantes desempeñan un papel clave en la reducción de iones metálicos y en la estabilización coloidal de las nanopartículas formadas. La eficiencia de este proceso está estrechamente relacionada con la capacidad antioxidante del sistema, la cual depende no solo de la concentración de compuestos bioactivos, sino también de la complejidad fitoquímica de la matriz vegetal utilizada (Ibrahim *et al.*, 2024 y Arshad *et al.*, 2024).

La complejidad fitoquímica hace referencia a la diversidad y posible interacción sinérgica entre múltiples metabolitos presentes en una matriz natural, lo que puede influir significativamente en los mecanismos de nucleación, crecimiento y estabilización de las nanopartículas. A diferencia de sistemas simplificados basados en compuestos puros, como la quercetina (un flavonoide ampliamente utilizado como modelo por su alta capacidad reductora), los extractos vegetales complejos pueden generar efectos cooperativos que modulan tanto la cinética de síntesis como las propiedades fisicoquímicas finales de las AgNPs (Ramírez-Rosas *et al.*, 2022 y Sharma *et al.*, 2023).

En este sentido, el garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*) representa una fuente subutilizada de compuestos bioactivos con alto potencial antioxidante, incluyendo betalainas, flavonoides y ácidos fenólicos, los cuales pueden actuar como agentes reductores y estabilizantes en procesos de síntesis verde. No obstante, el efecto de la complejidad fitoquímica de matrices vegetales frente a compuestos modelo puros en la formación de AgNPs aún no ha sido completamente esclarecido, particularmente en términos de su impacto en la eficiencia de reducción y estabilidad coloidal. Por lo tanto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la valorización del garambullo en la síntesis verde de nanopartículas de plata, analizando el efecto de su complejidad fitoquímica y su capacidad antioxidante en comparación con la quercetina como compuesto modelo.

Este enfoque contribuye a comprender los mecanismos involucrados en la biosíntesis de nanomateriales y promueve el aprovechamiento de biomasa regional en estrategias de economía circular orientadas al desarrollo de materiales funcionales de alto valor agregado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*)

El garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*) fue recolectado en Garabatillo, Dolores Hidalgo, Guanajuato, México (21°18'47" N, 100°44'47" W). Se seleccionaron frutos maduros, que fueron lavados, desinfectados con solución de plata ionizada al 30% v/v y secados al aire. Posteriormente, las muestras se almacenaron en bolsas herméticas y se conservaron a -20 °C hasta su uso.

Compuestos fenólicos totales y actividad antioxidante

El contenido de compuestos fenólicos totales del garambullo se determinó mediante el método de Folin-Ciocalteu (Singleton *et al.*, 1999). Los compuestos fueron extraídos con etanol al 50% v/v y reaccionaron con el reactivo de Folin-Ciocalteu y carbonato de sodio. La absorbancia se midió a 765 nm y se utilizó una curva patrón de ácido gálico para cuantificar los resultados, expresados como mg de equivalentes de ácido gálico (GAE) por gramo de muestra.

La actividad antioxidante se determinó mediante el método DPPH. Se mezclaron 0.1 mL del extracto con 2.9 mL de DPPH 0.1 mM y se midió la absorbancia a 517 nm. La actividad se expresó como porcentaje de inhibición respecto al control, utilizando una curva de calibración con concentraciones conocidas de DPPH (Gülcin, 2012).

La actividad antioxidante se determinó mediante el método ABTS, basado en la reducción del radical ABTS•+. Este se generó a partir de ABTS y persulfato de potasio, incubados en oscuridad durante 16 h. El extracto reaccionó con la solución de ABTS•+ y la absorbancia se midió a 734 nm. Los resultados se expresaron como equivalentes de Trolox (TE) mediante una curva de calibración.

Preparación de sistemas de nanopartículas de plata (AgNPs)

Se evaluaron cinco condiciones para la síntesis de nanopartículas de plata, incluyendo dos controles con quercetina (grado reactivo y comercial) y tres sistemas con extracto de garambullo a distintas concentraciones y pH (Tabla 1). Se preparó una solución de AgNO₃ (2 mM) y, por separado, soluciones de cada muestra en una mezcla hidroalcohólica. El pH inicial se ajustó con NaOH según el sistema. Posteriormente, se añadieron 2.5 mL de cada muestra a la solución de AgNO₃ bajo agitación constante (400 rpm) durante 2 h, seguido de un reposo de 24 h para favorecer la formación de las nanopartículas. El proceso se realizó a temperatura ambiente y en ausencia de luz (Ramírez-Rosas *et al.*, 2022).

Tabla 1. Condiciones de síntesis de nanopartículas de plata (AgNPs) obtenidas a partir de extractos etanólicos de *Myrtillocactus geometrizans*.

Tipo de extracto	Muestra (g)	pH de síntesis	Volumen de AgNO ₃ al 2mM (mL)	Etiqueta
Quercetina Grado Reactivo	0.003	7	25	QGR
Quercetina Grado Comercial	0.012	7	25	QGC
Garambullo completo	1.0	7	25	G 1-25 pH 7
Garambullo completo	2.0	7	25	G 2-25 pH 7
Garambullo completo	1.0	8	25	G 1-25 pH 8

Evaluación visual y UV/Vis

La formación y estabilidad de las nanopartículas de plata se evaluaron mediante espectroscopía UV-Vis en un equipo Thermo Scientific Genesys 10S (250–500 nm). La aparición de un cambio de color de transparente a dorado se consideró un indicativo de la formación de AgNPs, asociado a la reducción del nitrato de plata a AgNPs (Grigoras y Grigoras, 2024).

Actividad antimicrobiana

La actividad antimicrobiana de las AgNPs se evaluó mediante la técnica de difusión por disco frente a *Staphylococcus aureus* (Gram positiva) y *Escherichia coli* (Gram negativa). Las cepas se inocularon en agar y se colocaron discos impregnados con los sistemas evaluados (10 µL), incluyendo controles positivo (azitromicina) y negativo (caldo LB). Las placas se incubaron a 35 ± 2 °C durante 24 h y los halos de inhibición se midieron hasta 72 h. Todos los ensayos se realizaron por triplicado (Rizwana *et al.*, 2021).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contenido de compuestos fenólicos totales y actividad antioxidante por los métodos (DPPH, ABTS)

En cuanto al contenido de compuestos fenólicos, los resultados obtenidos muestran que el extracto de garambullo presentó un contenido de 60.893 ± 0.127 mg GAE/100 g, un valor superior al reportado previamente por López-Cortés *et al.*, 2025, para *Myrtillocactus geometrizans* (40.063 ± 0.280 mg GAE/100 g) y considerablemente mayor respecto a otro tipo de extracto como el acuoso (20.991 ± 0.140 mg GAE/100 g). Estas diferencias pueden atribuirse principalmente al tipo de solvente utilizado en la extracción, donde sistemas hidroetanólicos favorecen la solubilización de compuestos fenólicos frente a sistemas acuosos. Además, las condiciones de extracción (tiempo, temperatura, relación sólido-líquido). Adicionalmente, la variabilidad biológica del fruto incluye madurez, origen geográfico y condiciones de cultivo. Estos resultados sugieren que el extracto de garambullo presenta una mayor concentración de metabolitos reductores, lo cual es relevante para procesos de síntesis verde, ya que los compuestos fenólicos actúan como donadores de electrones en la reducción de Ag^+ a Ag^0 .

En cuanto a la capacidad antioxidante de 1559.11 ± 0.096 µM TE/100 g representa un valor inferior al reportado por López-Palestina *et al.* (2018) (2735 ± 15.230 µM TE/100 g), sin embargo, superior a frutos como zarzamora (1357.29 ± 20.760 µM TE/100 g) y mora azul (1253.9 ± 87.55 µM TE/100 g).

Adicionalmente, en otro sistema experimental por el método de DPPH se obtuvo un valor de 1016.50 ± 0.680 µM TE/100 g, ligeramente superior al reportado en la literatura (Sánchez-Recillas *et al.*, 2022) (907.9 ± 30.9 µM TE/100 g). Estas diferencias pueden deberse a la metodología empleada, ya que con DPPH se basa principalmente en la transferencia de hidrógeno y presenta afinidad por compuestos lipofílicos, lo que puede limitar su capacidad para detectar antioxidantes altamente polares presentes en matrices complejas como el garambullo. En contraste, el método ABTS, al ser soluble en medios tanto acuosos como orgánicos y operar mediante mecanismos de transferencia de electrones y de hidrógeno, permite evaluar una gama más amplia de compuestos antioxidantes. En consecuencia, ABTS tiende a reportar valores más altos y representativos de la capacidad antioxidante total, mientras que DPPH puede subestimar dicha capacidad dependiendo de la naturaleza de los compuestos presentes.

Sin embargo, estos resultados evidencian una tendencia positiva entre el contenido fenólico y la capacidad antioxidante, lo cual es consistente con el papel de los compuestos fenólicos como agentes donadores de electrones e hidrógeno. Estos hallazgos respaldan el potencial del garambullo como un recurso natural de alto valor agregado, ya que presenta propiedades comparables o superiores a frutos ampliamente estudiados, y puede ser aprovechado como materia prima en procesos de síntesis verde. Además, esto permite integrar estrategias de valorización de biomasa dentro de un modelo de economía circular.

Confirmación visual y UV-Vis

Una vez obtenidas las AgNPs, la producción por biosíntesis se confirmó visualmente por su color coloidal marrón, visible a simple vista. Durante la síntesis verde de nanopartículas de plata en los diferentes sistemas, se observó un cambio de color de amarillo pálido a amarillo dorado y finalmente a amarillo marrón, como se muestra en la Figura 1. Este cambio de color confirma visualmente la formación de nanopartículas después de 24 horas de síntesis. En los sistemas sintetizados con quercetina se puede observar una transición más dirigida hacia las tonalidades rojizas y marrón oscuro. Este comportamiento coincide con lo reportado con quercetina, considerada un agente reductor

altamente eficiente. Además, se encontró que la producción de AgNPs depende de la concentración de la solución de quercetina añadida y del pH, como fue confirmado por los espectros UV-Vis (Badi'Ah *et al.*, 2019).

La Figura 1 muestra los gráficos correspondientes al monitoreo de la estabilidad del plasmón característico de las AgNPs en un rango de aproximadamente 400-450 nm durante un periodo de 12 días, mediante el registro de los espectros UV-Vis de los cinco sistemas descritos en la Tabla 1. En los sistemas con extracto de garambullo (Figuras 1a, 1b y 1c), se observó una tendencia hacia la aglomeración de las nanopartículas, evidenciada por un ensanchamiento del pico, lo cual indica una distribución de tamaño más amplia. Sin embargo, el sistema con doble concentración de extracto de garambullo (Figura 1b) presentó un mayor tamaño promedio de partícula, reflejado en un mayor ancho de pico en comparación con los otros dos sistemas de garambullo. En cuanto al pH (Figuras 1a y 1c), no se observaron diferencias significativas en la formación del plasmón, aunque se detectó una velocidad más lenta de formación de partículas a pH 8 durante los primeros días.

En los sistemas con quercetina grado reactivo y grado comercial (Figuras 1d y 1e), se observó un hombro entre 340 y 350 nm, indicando la presencia de quercetina no reducida. Sin embargo, según la literatura, el plasmón característico de las AgNPs se encuentra típicamente en el rango de 400 a 450 nm (Jain y Mehata, 2017). Los espectros registrados a lo largo del tiempo confirmaron la estabilidad a largo plazo y la retención de esta señal en todos los sistemas, con un pico en 430 nm en UV-Vis.

Además, los sistemas con extracto de garambullo (Figuras 1a, 1b y 1c) mostraron mayor estabilidad y una señal espectral más definida en comparación con los sistemas con quercetina comercial o de grado reactivo. Esto sugiere que, aunque es factible sintetizar AgNPs utilizando quercetina pura aislada a pH 7, las nanopartículas obtenidas pueden presentar un desempeño inferior en aplicaciones antimicrobianas en comparación con aquellas sintetizadas con garambullo.

En comparación con otros estudios en los que se realizó la síntesis de AgNPs usando extracto de *Lawsonia inermis* (henna), se observó un máximo de absorción en 460 nm (Singh *et al.*, 2024), correspondiente a la región visible del espectro. Este valor es ligeramente diferente al obtenido con los extractos de garambullo. Por otro lado, las AgNPs sintetizadas con extracto de *Thymus vulgaris* mostraron un comportamiento óptico característico de las nanopartículas de plata, con un máximo de absorción en el rango de 400 a 500 nm, con una concentración cercana a los 400 nm (Pacheco *et al.*, 2023).

Los sistemas obtenidos con extracto de garambullo no solo lograron reducir eficientemente los iones de plata, sino que también actuaron como agentes estabilizantes, promoviendo una morfología uniforme y una mayor estabilidad de las partículas en comparación con sistemas sintetizados con otros extractos. Esto resalta las propiedades únicas del extracto de garambullo en la síntesis y estabilización de nanopartículas de plata (AgNPs), lo que lo posiciona como un agente eficaz en la síntesis verde de nanopartículas.

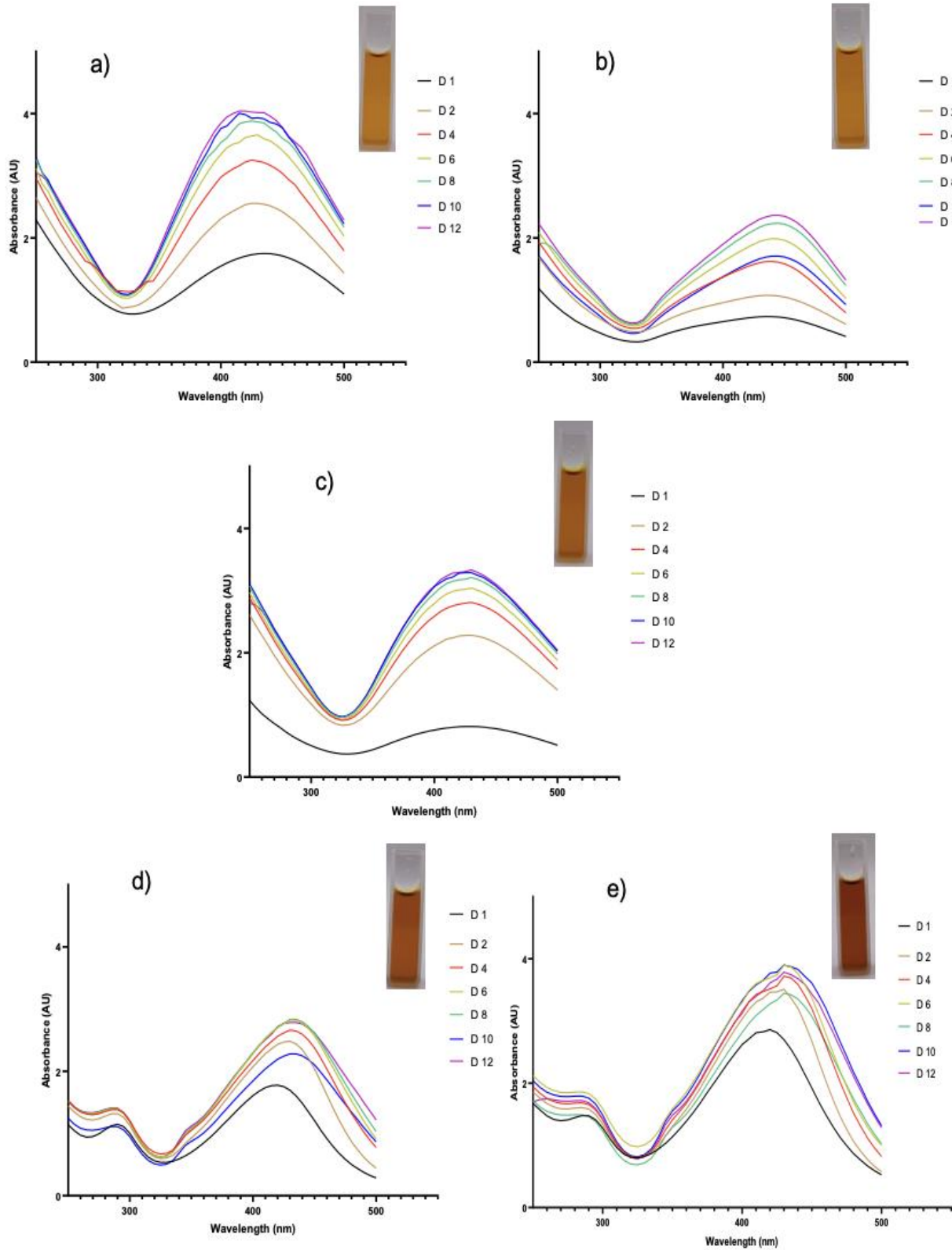


Figura 1. Síntesis de nanopartículas plasmón superficial a) G 1-25 pH 7; b) G 2-25 pH 7; c) G 1-25 pH 8 d) QGR 1-25 pH 7; e) QGC 1-25 pH 7

Actividad antimicrobiana

Las bacterias Gram negativas presentan mayor resistencia a los antibióticos debido a la complejidad estructural de su pared celular. A diferencia de las bacterias Gram positivas, las Gram negativas poseen una capa delgada de peptidoglicano cubierta por una membrana externa, la cual actúa como una barrera adicional y limita la permeabilidad de sustancias hidrofóbicas, incluidas las nanopartículas (Samuggam *et al.*, 2021). Los resultados de las pruebas de difusión en disco para todos los sistemas se muestran en las Tablas 2 y 3. Todos los sistemas exhibieron actividad antimicrobiana.

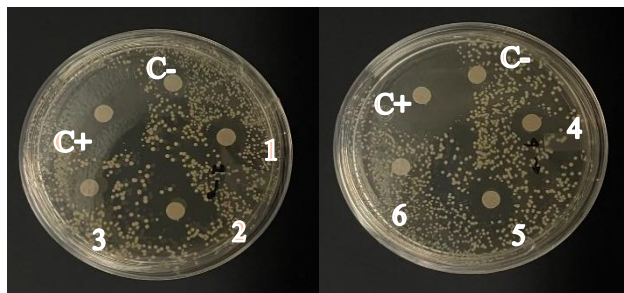


Figura 2. Caja Petri con la difusión de los discos para la inhibición de *Staphylococcus aureus* ATCC-6538 y actividad antimicrobiana de nanopartículas de plata (AgNPs) representativas sintetizadas a partir de garambullo. 1. QGR; 2. QGC; 3. G 1-25 pH 7; 4. G 2-25 pH 7; 5. G 1-25 pH 8; y 6. Garambullo sin síntesis de nanopartículas de plata; C+ antibiótico azitromicina; C- caldo nutritivo LB.

El control GB, corresponde al extracto puro sin nanopartículas de plata, el cual se observó que no presentó zona de inhibición tanto para *Staphylococcus aureus* ATCC 6538, como para *Escherichia coli* ATCC 25922, durante las 24, 48 y 72 h de evaluación (Tabla 2 y 3). Lo que nos indica que el extracto por sí solo no ejerció una actividad antibacteriana detectable mediante el método de difusión en disco, lo cual puede ser debido a que posiblemente el método presenta limitaciones para la evaluación de extractos vegetales complejos (Bubonja-Šonje *et al.*, 2020)

En la Tabla 2, los sistemas sintetizados con extracto de garambullo mostraron un mayor halo de inhibición contra *S. aureus*. Los sistemas de AgNPs con quercetina química (QGR y QGC) presentaron una reducción en la zona de inhibición con el tiempo, lo cual era esperado, ya que las mediciones de UV/Vis indicaron que las AgNPs se aglomeraron y la resonancia plasmónica disminuyó gradualmente, a diferencia de aquellas sintetizadas con extracto de garambullo. Vanlalveni *et al.*, 2021; Jain *et al.*, 2021, mencionan que la disminución de la actividad antimicrobiana de las AgNPs, está relacionado con la estabilidad coloidal ya que esta favorece la formación de conglomerados de mayor tamaño y provoca la reducción del área de interacción con la membrana de las bacterias y en consecuencias hay liberación de Ag^+ .

En cuanto a los sistemas con Garambullo, se observó que solo el que mostró un aumento en su resonancia plasmónica fue el G 1-25, pH 8, que presentó una mejor inhibición frente a *S. aureus* a las 72 horas. Esto podría deberse a la mayor presencia de nanopartículas de plata (AgNP), resultado de la adecuada presencia y proporción de quercetina natural en el garambullo, que supera a la quercetina sintética. Para la cepa *E. coli* ATCC-25922, la efectividad fue menor y mostró una mejor inhibición frente a la cepa *Staphylococcus aureus* ATCC-6538. Este comportamiento coincide con lo reportado por Bruna *et al.*, 2021 y Rodrigues *et al.*, 2024, quienes describen que las bacterias Gram negativas suelen mostrar una mayor resistencia relativa a las AgNPs debido a la complejidad de su envoltura celular.

Los resultados en la Tabla 3 mostraron que los sistemas de AgNPs QGR y QGC presentaron una disminución en el halo de inhibición con el tiempo. En cuanto a los sistemas con garambullo, solo aquellos que mostraron un aumento en su resonancia plasmónica (G 2-25 pH 7 y G 1-25 pH 8) demostraron mejor inhibición contra *E. coli* a las 72 horas.

Tabla 2. Actividad antibacteriana por método de difusión por discos de todos los sistemas de AgNPs contra *Staphylococcus aureus* ATCC-6538

Sistemas de AgNPs	Zona media de inhibición (mm)		
	24 H	48 H	72 H
G 1-25 pH 7	23.33±0.31 ^c	21.07±0.31 ^c	20.03±0.28 ^d
G 2-25 pH 7	25.20±0.26 ^c	24.57±0.21 ^c	20.87±0.42 ^d
G 1-25 pH 8	26.23±0.25 ^b	26.00±0.01 ^b	24.83±0.29 ^b
QRG	25.40±0.20 ^c	20.07±0.31 ^f	18.90±0.17 ^e
QCR	24.87±0.23 ^d	23.67±0.23 ^d	21.81±0.32 ^c
Control GB	-	-	-
Control +	30.00±0.00 ^a	29.90±0.17 ^a	28.63±0.38 ^a
Control -	-	-	-

Letras iguales entre columnas indican ausencia de diferencias significativas (ANOVA–Tukey, $p \leq 0.05$).

Cabe destacar que *Staphylococcus aureus* presentó halos de inhibición de mayor diámetro en comparación con *Escherichia coli*. Este comportamiento puede atribuirse a las diferencias estructurales presentes en sus paredes celulares. Las bacterias Gram positivas, como *S. aureus*, poseen una pared celular compuesta principalmente por una gruesa capa de peptidoglucano y carecen de una membrana externa, lo que facilita la interacción y penetración de los agentes antimicrobianos. En contraste, las bacterias Gram negativas, como *E. coli*, presentan una estructura celular más compleja, caracterizada por una capa delgada de peptidoglucano rodeada por una membrana externa rica en lipopolisacáridos, la cual actúa como una barrera adicional que limita la entrada de compuestos antimicrobianos (Rabha *et al.*, 2024). Como consecuencia, *E. coli* exhibió una menor sensibilidad frente a las nanopartículas de plata, reflejada en diámetros de inhibición más reducidos en comparación con los observados para *S. aureus*.

Tabla 3. Actividad antibacteriana por el método de difusión por discos de todos los sistemas de nanopartículas de plata (AgNPs) frente a *Escherichia coli* ATCC 25922

Sistemas de AgNPs	Zona media de inhibición (mm)		
	24 H	48 H	72 H
G 1-25 pH 7	11.83±0.80 ^d	11.76±0.57 ^d	10.52±0.50 ^c
G 2-25 pH 7	13.56±0.43 ^b	12.73±0.80 ^b	11.67±0.76 ^a
G 1-25 pH 8	14.49±0.45 ^a	12.77±0.37 ^b	11.82±0.42 ^a
QRG	11.62±0.54 ^d	11.43±0.38 ^e	10.67±0.58 ^c
QCR	14.40±0.53 ^a	13.33±0.58 ^a	11.33±0.58 ^b
Control GB	-	-	-
Control +	13.05±0.08 ^b	12.53±0.25 ^c	11.80±0.10 ^a
Control -	-	-	-

Letras iguales entre columnas indican ausencia de diferencias significativas (ANOVA–Tukey, $p \leq 0.05$).

CONCLUSIONES

El extracto de garambullo mostró mayor contenido fenólico y capacidad antioxidante, permitiendo la síntesis de AgNPs más estables, con mejor respuesta óptica y mayor actividad antimicrobiana frente a *Staphylococcus aureus* que los sistemas con quercetina, mientras que la menor inhibición en *Escherichia coli* evidenció la influencia

estructural bacteriana, confirmando el efecto sinérgico de su complejidad fitoquímica y su potencial como recurso valorizable en nanotecnología alimentaria dentro de un enfoque de economía circular.

AGRADECIMIENTOS

María Guadalupe López-Cortés agradece a SECIHTI por la beca doctoral 1149972. Ma. Cristina Irma Pérez-Pérez agradece al TecNM por la financiación y apoyo al proyecto 22063.25-P (Síntesis de nanopartículas de plata a partir de extractos naturales como agentes reductores bioactivos).

BIBLIOGRAFÍA

- Abada, E., Mashraqi, A., Modafar, Y., Al Abboud, M. A., & El-Shabasy, A. (2024). Review: Green synthesis of silver nanoparticles by using plant extracts and their antimicrobial activity. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 31(1), 103877. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2023.103877>
- Arshad, F., Naikoo, G. A., Hassan, I. U., Chava, S. R., El-Tanani, M., Aljabali, A. A., & Tambuwala, M. M. (2024). Bioinspired and green synthesis of silver nanoparticles for medical applications: A green perspective. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 196, 3636–3669. <https://doi.org/10.1007/s12010-023-04719-z>
- Badi'Ah, H. I., Seede, F., Supriyanto, G., & Zaidan, A. H. (2019). Synthesis of silver nanoparticles and the development in analysis method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 217(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/217/1/012005>
- Bruna, T., Maldonado-Bravo, F., Jara, P., & Caro, N. (2021). Silver nanoparticles and their antibacterial applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(13), 7202. <https://doi.org/10.3390/ijms22137202>
- Bubonja-Šonje, M., Knežević, S., & Abram, M. (2020). Challenges to antimicrobial susceptibility testing of plant-derived polyphenolic compounds. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*, 71(4), 300–311. <https://doi.org/10.2478/aiht-2020-71-3396>
- Grigoras, A. G., & Grigoras, V. C. (2024). Eco-friendly silver nanoparticles obtained by green synthesis from *Salvia officinalis*. *Sustainable Chemistry*, 5(3), 215–228. <https://doi.org/10.3390/suschem5030014>
- Gülcin, I. (2012). Antioxidant activity of food constituents: An overview. *Archives of Toxicology*, 86(3), 345–391. <https://doi.org/10.1007/s00204-011-0774-2>
- Huq, M. A., Ashrafudoulla, M., Rahman, M. M., Balusamy, S. R., & Akter, S. (2022). Green synthesis and potential antibacterial applications of bioactive silver nanoparticles: A review. *Polymers*, 14(4), 742. <https://doi.org/10.3390/polym14040742>
- Ibrahim, N. H., Taha, G. M., Hagaggi, N. S. A., & Moghazy, M. A. (2024). Green synthesis of silver nanoparticles and its environmental sensor ability to some heavy metals. *BMC Chemistry*, 18, Article 7. <https://doi.org/10.1186/s13065-023-01105-y>
- Jain, A. S., Pawar, P. S., Sarkar, A., Junnuthula, V., & Dyawanapelly, S. (2021). Bionanofactories for green synthesis of silver nanoparticles: Toward antimicrobial applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(21), 11993. <https://doi.org/10.3390/ijms222111993>
- Jain, S., & Mehata, M. S. (2017). Medicinal plant leaf extract and pure flavonoid mediated green synthesis of silver nanoparticles and their enhanced antibacterial property. *Scientific Reports*, 7(1), 15867. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15724-8>
- López-Cortés, M. G., Peña-Juarez, M. G., Angel-Olarte, C. M. D., Delgado-Alvarado, E., Gonzalez-Calderon, J. A., & Pérez-Pérez, M. C. I. (2025). Green synthesis of silver nanoparticles using *Myrtillocactus*

geometrizans extract for enhancing stability and antimicrobial properties. *ChemistrySelect*, 10(45), e03730. <https://doi.org/10.1002/slct.202503730>

- López-Palestina, C. U., Aguirre-Mancilla, C. L., Ramírez-Pimentel, J. G., Raya-Pérez, J. R., Santiago-Saenz, Y. O., Gutiérrez-Tlahque, J., & Hernández-Fuentes, A. (2019). Compuestos bioactivos y actividad antioxidante en tres estados de madurez de *Myrtillocactus geometrizans* provenientes del Valle del Mezquital, Hidalgo. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 4(1), 317–322.
- Pacheco, A. R. F., Cardoso, B. D., Pires, A., Pereira, A. M., Araújo, J. P., Carvalho, V. M., Rodrigues, R. O., Coutinho, P. J. G., Castelo-Grande, T., & Castanheira, E. M. S. (2023). Development of pH-sensitive magnetoliposomes containing shape anisotropic nanoparticles for potential application in combined cancer therapy. *Nanomaterials*, 13(6), 1051. <https://doi.org/10.3390/nano13061051>
- Parmar, S., Kaur, H., Singh, J., Matharu, A. S., Ramakrishna, S., & Bechelany, M. (2022). Recent advances in green synthesis of Ag NPs for extenuating antimicrobial resistance. *Nanomaterials*, 12(7), 1115. <https://doi.org/10.3390/nano12071115>
- Rabha, D., Sarma, H., Borah, M., Ghose, V., Barman, D., Rao, S., Sarma, H. S., Devi, R., & Chandra Boruah, D. (2024). *Clerodendrum japonicum* (Thunb.) Sweet leaf extract supported nanosilver particles: Characterization, antioxidant and antibacterial activity. *Vietnam Journal of Science and Technology*, 62(6), 1065–1076. <https://doi.org/10.15625/2525-2518/19376>
- Ramírez-Rosas, S. L., Delgado-Alvarado, E., Sánchez-Vargas, L. O., Herrera-May, A. L., Peña-Juárez, M. G., & González-Calderon, J. A. (2022). Green route to produce silver nanoparticles using the bioactive flavonoid quercetin as a reducing agent and food anti-caking agents as stabilizers. *Nanomaterials*, 12(19), 3545. <https://doi.org/10.3390/nano12193545>
- Rizwana, H., Alwhibi, M. S., Aldarsone, H. A., Awad, M. A., Soliman, D. A., & Bhat, R. S. (2021). Green synthesis, characterization, and antimicrobial activity of silver nanoparticles prepared using *Trigonella foenum-graecum* L. leaves grown in Saudi Arabia. *Green Processing and Synthesis*, 10(1), 421–429. <https://doi.org/10.1515/gps-2021-0043>
- Rodrigues, A. S., Batista, J. G. S., Rodrigues, M. Á. V., Thipe, V. C., Minarini, L. A. R., Lopes, P. S., & Lugão, A. B. (2024). Advances in silver nanoparticles: A comprehensive review on their potential as antimicrobial agents and their mechanisms of action elucidated by proteomics. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1440065. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1440065>
- Samuggam, S., Chinni, S. V., Mutusamy, P., Gopinath, S. C., Anbu, P., Venugopal, V., Reddy, L. V., & Enugutti, B. (2021). Green synthesis and characterization of silver nanoparticles using *Spondias mombin* extract and their antimicrobial activity against biofilm-producing bacteria. *Molecules*, 26(9), 2681. <https://doi.org/10.3390/molecules26092681>
- Sánchez-Recillas, E., Campos-Vega, R., Pérez-Ramírez, I. F., Luzardo-Ocampo, I., Cuéllar-Núñez, M. L., & Vergara-Castañeda, H. A. (2022). Garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*): Effect of in vitro gastrointestinal digestion on the bioaccessibility and antioxidant capacity of phytochemicals. *Food & Function*, 13(8), 4699–4713. <https://doi.org/10.1039/D1FO04392G>
- Shahzadi, S., Fatima, S., Shafiq, Z., & Janjua, M. R. S. A. (2025). Green synthesis of silver nanoparticles using plant extracts. *RSC Advances*, 15, 3858–3903. <https://doi.org/10.1039/D4RA07519F>
- Sharma, R., Basist, P., Alhalmi, A., Khan, R., Noman, O. M., & Alahdab, A. (2023). Synthesis of quercetin-loaded silver nanoparticles and assessing their anti-bacterial potential. *Micromachines*, 14(12), 2154. <https://doi.org/10.3390/mi14122154>
- Singh, S., Arya, H., Sahu, W., Reddy, K. S., Nimesh, S., Alotaibi, B. S., & Kumar Bhatt, T. (2024). Green synthesized silver nanoparticles of *Terminalia bellirica* leaves extract: Synthesis, characterization, in-

silico studies, and antimalarial activity. *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, 52(1), 238–249. <https://doi.org/10.1080/21691401.2024.2339429>

Singleton, V., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*, 299, 152–178. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)

Vanlalveni, C., Lallianrawna, S., Biswas, A., Selvaraj, M., Changmai, B., & Rokhum, S. L. (2021). Green synthesis of silver nanoparticles using plant extracts and their antimicrobial activities: A review of recent literature. *RSC Advances*, 11, 2804–2837. <https://doi.org/10.1039/D0RA09941D>