

### Síntesis verde y caracterización de nanopartículas de plata estabilizadas con un polímero biodegradable para aplicaciones agrícolas en el control sostenible de plagas y enfermedades

Green synthesis and characterization of silver nanoparticles stabilized with a biodegradable polymer for agricultural applications in the sustainable control of pests and diseases

Andrea Poaquiza ; Luz Toapanta ; Giulliana A Criollo <sup>1</sup>; José A Velasco <sup>1</sup>;  
Vladimir A Aguirre <sup>2</sup>, Carlos Caiza-Valencia <sup>1</sup>, Leonor M Rivera <sup>3</sup>,  
Andrés Izquierdo <sup>1,2</sup>; Pablo Landázuri <sup>1</sup>, Pedro Romero <sup>1</sup>, Carlos M. Noceda <sup>1,4</sup>,  
Luis E. Trujillo <sup>1,2\*</sup>

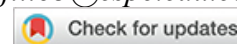
<sup>1</sup> Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura. Grupo de Biotecnología Industrial y Bioproductos Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE), Ecuador.

<sup>2</sup> Centro de Nanociencia y nanotecnología (CENCINAT). Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE)

<sup>3</sup> Universidad Técnica de Machala-Machala (UTEMACH), El Oro, Ecuador

<sup>4</sup> Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Autor para correspondencia: Dr. Luis E. Trujillo, Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE), Ecuador, Tel: +81-3-5800-8653; Fax: +81-3-3811-6822; E-mail: letrujillo3@espe.edu.ec



## RESUMEN

El aumento de la población mundial y la creciente demanda agrícola ha impulsado a encontrar alternativas sostenibles y seguras ambientalmente para garantizar la calidad de cultivos y la lucha contra las plagas. Las nanopartículas de plata (AgNPs) se presentan como una solución prometedora frente a los problemas causados por las plagas, debido a sus propiedades insecticidas y bactericidas. Sin embargo, estas son inestables y tienden a formar aglomerados, lo que hace que pierdan sus propiedades imposibilitando su uso como un producto alternativo a los plaguicidas químicos. Es por esto que se estandarizó por primera vez en esta investigación un método de síntesis en un solo paso de nanopartículas de plata utilizando el polímero polivinilpirrolidona (PVP) como agente estabilizante y de esta forma se obtuvo un nanocomposito (NCPs). La caracterización de estas AgNPs se realizó por espectrofotometría UV-Vis en la cual se observó un pico de absorbancia máxima de 3,25 ubicado a 398 nm de longitud de onda, con tamaños de partícula de 10,8 nm y una composición de carbono, oxígeno, nitrógeno y plata, estables a lo largo de 326 días. Un análisis termogravimétrico también demostró la estabilidad térmica del NCP hasta los 500 °C. Este NCP, altamente estable fue capaz de controlar a ejemplares de mosca blanca en diferentes estadios presentes en hojas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) infestadas naturalmente en condiciones de invernadero después de aplicar 3 dosis diferentes del nanocomposito correspondientes a 64, 32 y 16 ppm respectivamente. La tasa de mortalidad promedio encontrada en estos experimentos a nivel de laboratorio, fue de un 98 %, después de 10 días de aplicación del nanocomposito en las hojas infestadas, aunque ya a las 24 y 48 horas se observó mortalidad. Adicionalmente, en un ensayo de inhibición por difusión en placas de agar, se encontró inhibición del crecimiento de *Bacillus amyloliquefaciens*, *Pseudomonas syringae* y *Xanthomonas sp* con halos de inhibición de hasta 20 mm de diámetro. En conclusión, estas nanopartículas poseen las propiedades necesarias para ser consideradas como materia prima de un potencial nanobiopesticida para su uso en agricultura orgánica como sustitutos pesticidas químicos.

**Palabras clave:** AgNPs, PVP, nanocomposito, termogravimetría, estabilidad térmica, mosca blanca

## ABSTRACT

The world population and the increasing agricultural demand have prompted the need to find sustainable and environmentally safe alternatives to guarantee crop quality and fight against pests. Silver nanoparticles (AgNPs) are a promising solution to problems caused by pests due to their insecticidal and bactericidal properties. However, these compounds are unstable and tend to form agglomerates, which causes them to lose their properties, making it impossible to use them as an alternative product to chemical pesticides. This is why a one-step synthesis method for silver nanoparticles using the polymer polyvinylpyrrolidone (PVP) as a stabilizing agent was standardized for the first time in this research. The characterization of these AgNPs was carried out by UV-Vis spectrophotometry in which a maximum absorbance peak of 3.25 was observed located at 398 nm wavelength, with particle sizes of 10.8 nm and carbon composition, oxygen, nitrogen, and silver, stable over 326 days. A thermogravimetric analysis also demonstrated the thermal stability of the nanocomposite up to 500 °C. This highly stable nanocomposite was able to control whitefly specimens in different stages present on tomato leaves (*Solanum lycopersicum* L.) naturally infested under greenhouse conditions after applying 3 different doses of the nanocomposite corresponding to 64, 32, and 16 ppm, respectively. The average mortality rate found in these laboratory experiments was 98% after 10 days of nanocomposite application on the infested leaves, although mortality was observed after 24 and 48 hours. Additionally, in a diffusion inhibition assay on agar plates, inhibition of *Bacillus amyloliquefaciens*, *Pseudomonas syringae*, and *Xanthomonas* sp growth was found, with inhibition zones of up to 20 mm. In conclusion, these nanoparticles have the necessary properties to be considered raw material for a potential nano biopesticide for use in organic agriculture as chemical pesticide substitutes.

**Keywords:** AgNPs, PVP, nanocomposite, thermogravimetry, thermal stability, White fly

## INTRODUCCIÓN

El aumento continuo de la población mundial ha generado una creciente demanda de alimentos, lo que impulsa a la industria agrícola a buscar alternativas que mejoren la calidad de los cultivos, combatan plagas, garanticen la seguridad ambiental y sean económicamente accesibles. En este contexto, la nanotecnología se presenta como una posible solución inteligente, ofreciendo la síntesis de nanomateriales que sean capaces de cumplir con estos objetivos<sup>1</sup>. Las nanopartículas de plata (AgNPs) han sido uno de los nanomateriales más estudiados en las últimas décadas debido a sus diversas propiedades, las cuales varían significativamente según el método de síntesis empleado, siendo de interés agronómico por sus propiedades antibacterianas e insecticidas<sup>2,3</sup>. El empleo de nanopartículas obtenidas a través de diferentes métodos de síntesis para utilizarlas como nuevos pesticidas ha atraído una gran atención. Se han llevado a cabo una cantidad impresionante de estudios para probar potencial tóxico de estas nanopartículas contra una gran cantidad de plagas y vectores, con especial énfasis en mosquitos, garrapatas y ácaros<sup>4</sup>. Sin embargo, no existen muchos reportes del efecto de estas nanopartículas sobre la mosca blanca y sus diferentes estadios. Existen dos enfoques principales para la síntesis de AgNPs: el enfoque "top-down", que utiliza métodos físicos, y el enfoque "bottom-up", que emplea métodos químicos o biológicos<sup>5,6</sup>. Dentro de la agricultura, el método de síntesis biológica mediante extractos de plantas es el más utilizado, ya que no requiere compuestos peligrosos para el medio ambiente, y las AgNPs obtenidas poseen características distintas en comparación con otros métodos de síntesis<sup>5,7</sup>. La principal ventaja del uso de extractos de plantas para la síntesis verde de nanopartículas es la disponibilidad de este material vegetal, además del hecho de que tienen una toxicidad baja o nula en comparación a otros métodos<sup>8</sup>. Por otro lado, debido a la amplia gama de metabolitos secundarios presentes en los extractos ayudan en la reducción de los materiales de forma más rápida<sup>9</sup>. Finalmente, los flavonoides, esteroides y carbohidratos proporcionan actividad de recubrimiento y estabilidad a la nanopartícula<sup>10</sup>. Por otra parte, la principal desventaja de la

síntesis de AgNPs mediante métodos químicos o biológicos es que las nanopartículas tienden a aglomerarse o a sufrir modificaciones en su superficie, lo que puede influir en su estabilidad y disminución de su toxicidad frente a los diferentes organismos. Este hecho limita su uso como un pesticida eficiente. Para mitigar estos problemas, se ha propuesto la funcionalización de la superficie de las nanopartículas utilizando recubrimientos de polímeros biodegradables <sup>11</sup>. Este tipo de funcionalización y estabilización de nanopartículas mediante polímeros se conoce como método estérico. <sup>12</sup> La polivinilpirrolidona (PVP) es un polímero biodegradable capaz de estabilizar y controlar el tamaño y la forma de las AgNPs. Por sí sola es capaz de reducir los iones de plata  $Ag^+$  procedentes de una sal precursora a plata metálica  $Ag^0$  pero de manera lenta, lo que puede resultar en nanopartículas de gran tamaño y con una distribución de tamaño polidisperso, es por esto que se recurre al uso de agentes reductores auxiliares como el borohidruro de sodio. <sup>13,14</sup> Por lo tanto, el objetivo de esta tesis de investigación fue estandarizar un método de síntesis biológico para AgNPs utilizando extracto de romero (*Rosmarinus officinalis* L.) como agente reductor auxiliar, en presencia de PVP como agente estabilizante, en un solo paso, con el fin de obtener un nanocomposito (NCP) con nanopartículas con tamaños y distribución uniforme. Además de evaluar su carácter insecticida y bactericida a nivel de laboratorio con la intención de utilizarlas posteriormente como materia prima para un nanobiopesticida con aplicación a cultivos en invernadero principalmente orientados a cultivos orgánicos.

---

## MATERIALES Y METODOS

Para la preparación de las AgNPs se utilizó el polímero biodegradable polivinilpirrolidona (PVP) 4000 (Sigma - Aldrich), hidróxido de sodio (Sigma - Aldrich), nitrato de plata  $AgNO_3$  (Fisher Scientific). Para el extracto se usaron plantas de romero adquiridas en un supermercado (Quito, Ecuador) y etanol al 96% (Casa del Químico, Quito, Ecuador). Todas las soluciones se prepararon con agua destilada tipo I.

### Obtención del extracto de romero (*Rosmarinus officinalis* L.) utilizado como agente reductor

El procedimiento se realizó según en el reporte de Pardo y cols., (2022) pero con modificaciones propias. Se pesaron 50 g de hojas de romero, las cuales se lavaron tres veces con agua corriente y dos veces con agua destilada. Posteriormente, se colocaron en un frasco de vidrio con una capacidad de 100 mL, al cual se le agregó una solución compuesta por 75 mL de etanol al 96% y 25 mL de agua destilada. El frasco se cubrió con papel aluminio y se dejó reposar durante 4 días a temperatura ambiente en un lugar oscuro. Después de los 4 días, se obtuvo una solución de color verde oscuro que fue colada y transferida a un balón, el cual se colocó en un rotavapor Bucci II. El proceso de evaporación se realizó a 40 °C con baño maría y a una presión de 85 mbar durante 3 horas, para extraer todo el etanol. Del extracto concentrado obtenido, se tomaron varias alícuotas de 20 mL, las cuales se diluyeron con agua destilada hasta completar un volumen total de 100 mL. Estas diluciones se sometieron a filtración al vacío utilizando una membrana con un tamaño de poro de 0,45 µm. Una vez filtradas, las soluciones se colocaron en tubos Falcon de 50 mL y se almacenaron a 4 °C.

### Síntesis de AgNPs – recubiertas con polímero PVP

Este procedimiento se realizó de forma general siguiendo los protocolos reportados por Singh y cols., (2023), con modificaciones propias que nos permitieron la obtención del nanocompuesto en un solo paso. Se calentaron 120 mL de agua destilada en una plancha de agitación Termoline hasta llegar a 90 °C y se agregó 1 g de polímero (PVP). Se agitó a 2000 rpm hasta que se disolvió por completo el polímero e inmediatamente se agregaron 10 mL de hidróxido de sodio 0,1M y 20 mL de nitrato de plata 0,01M. Se esperó por 5 minutos y se agregaron 16 mL de extracto de romero (*Rosmarinus officinalis* L.) dejándose reaccionar durante 3 horas. Todos los ensayos de caracterización de los nanocompositos obtenidos que se presentan a continuación se realizaron en el laboratorio de materiales avanzados de la universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y de la Universidad de Yachay Tech., Ecuador.

### Caracterización del NCP obtenido en el espectrofotómetro tipo UV - Vis

Se utilizó un espectrofotómetro Thermo Scientific Genesys 10 UV. En una celda de cuarzo de capacidad de 4 mL se colocaron 3 mL de agua destilada tipo 1 para generar la línea base y blanco, una vez obtenida la línea base, se descartó el agua que contenía la celda y se le añadió 3,5 mL de agua destilada tipo 1 junto con 100  $\mu$ L de los nanocompuestos obtenidos (NCPs) y AgNPs en el caso del grupo control, obtenidos después de las tres horas de reacción. Se tapó la celda y se homogeneizó por inmersión. Se colocó la celda en el equipo y se corrió con condiciones de barrido en longitudes de onda desde los 200 hasta los 750 nm.

### Caracterización del NCP en el analizador de partículas

La caracterización del NCP se realizó en un analizador de partículas de la marca Horiba InColor Dynamic Light Scattering Particle Size Analyzer LB – 550. Las condiciones de caracterización en cuanto a índices de refracción fueron para las AgNPs valores de 0.190 - 3.400i y para el dispersante en este caso agua 1.333 con una densidad de 1 g/cm<sup>3</sup>. Para realizar la medición se colocaron 3.5 mL de agua destilada tipo 1 en una celda de cuarzo de 4 mL de capacidad, a esta se le agregaron 10  $\mu$ L de los NCPs y AgNPs sin recubrir para el grupo control obtenidos después de las 3 horas de reacción. Se tapó la celda y se homogeneizó por inmersión, se colocó la celda en el equipo, se realizó el control de temperatura a 25 °C por parte del electrodo interno de la máquina y se procedió a medir la muestra.

### Caracterización del NCP por espectroscopia foto electrónica de rayos X (XPS)

Se colocaron gotas de la NCP en una platina de muestras para su secado, después se colocó la platina en la cámara del XPS (Alter technology SA.), se cerró y se esperó a que llegue a condiciones de ultra vacío. Posteriormente se siguió el protocolo de medición utilizando el programa recomendado por los fabricantes.

### Análisis termogravimétrico

Para el análisis termogravimétrico se utilizó un equipo TGA 55 (Waters.SA). Se taró el crisol portador de la muestra en el que posteriormente se colocó una gota de las nanopartículas, ingresándole directamente al horno del equipo programado con las siguientes condiciones: Intervalo de temperatura desde 0 a 650 °C, velocidad de 10 °C por minuto y atmósfera oxidante, el ensayo duró hora con treinta minutos.

### Evaluación del carácter insecticida del NCP

El NCP se aplicó a hojas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) infestadas naturalmente mostrando diferentes estadios de mosca blanca. Estas hojas se obtuvieron a partir de plantas crecidas en invernadero de cultivos orgánicos en condiciones reales de producción. Se cortaron 6 hojas al azar de diferentes plantas por réplica incluyendo al control, por lo que para 3 réplicas se utilizaron 18 hojas infestadas que tuvieran diferentes estadios de la mosca para cada dosis de 64,34 y 16 ppm del NCP a evaluar. Antes de la aplicación del NCP a cada hoja infestada individualizada en un recipiente plástico de 30 x 10 cm, con tapa, se realizó el conteo previo de los individuos en el envés de la hoja con la ayuda de un estereomicroscopio. Después se colocó papel absorbente y se roció agua destilada para mantener las hojas hidratadas. Posteriormente, se aplicó el NCP según la dosis (64, 32 o 16 ppm) directamente en las hojas con un atomizador de una capacidad de 50 mL, cubriendo toda la hoja, sin dejar zonas sin humedecer. Las 6 hojas correspondientes al control se asperjaron con agua destilada. Después de 24, 48 horas hasta 10 días posterior a la aplicación, se realizó el conteo de individuos nuevamente, pero esta vez distinguiendo entre individuos vivos o muertos comparando con los controles a los que solo se les aplicó agua. Se tomó como criterio de mortalidad la respuesta de las ninfas o la eclosión de huevos al tratamiento comparándolo con las hojas control infestadas y no tratadas con el nanocomposito.

### Evaluación del carácter bactericida del NCP

La prueba de inhibición del crecimiento bacteriano se llevó a cabo mediante el método de difusión en disco de agar utilizando 100  $\mu$ L de una suspensión de inóculo de cada bacteria a evaluar estandarizada que contenía 10<sup>7</sup> UFC/ml de bacterias.<sup>17</sup> Para ello se obtuvo un césped bacteriano de 3 cepas, *Bacillus amyloliquefaciens*, *Pseudomonas syringae* y *Xanthomonas sp* aisladas directamente de cultivo de tomate y babaco respectivamente. Estas 3 cepas fueron previamente caracterizadas microbiológica y molecularmente para confirmar identidad y pureza. Sobre el césped de cada placa Petri Agar LB, se procedió a colocar discos de papel filtro utilizando un sacabocados de 1.3 mm los cuales fueron esterilizados en autoclave a 120 °C y 15 psi de presión

durante 1 hora. Se colocaron 5 discos de papel en cada una de las placas sembradas. Al disco ubicado en el centro de la placa se le colocó 80 uL de agua destilada estéril y en los 4 discos restantes se colocaron 80 uL del NCP dependiendo de la dilución a utilizar (64, 32, 16 ppm). Se sellaron las placas con Parafilm y se incubaron a 25 °C durante cuatro días. Transcurrido este tiempo se realizó la medición de los halos de inhibición de crecimiento bacteriano.

### **Análisis estadísticos**

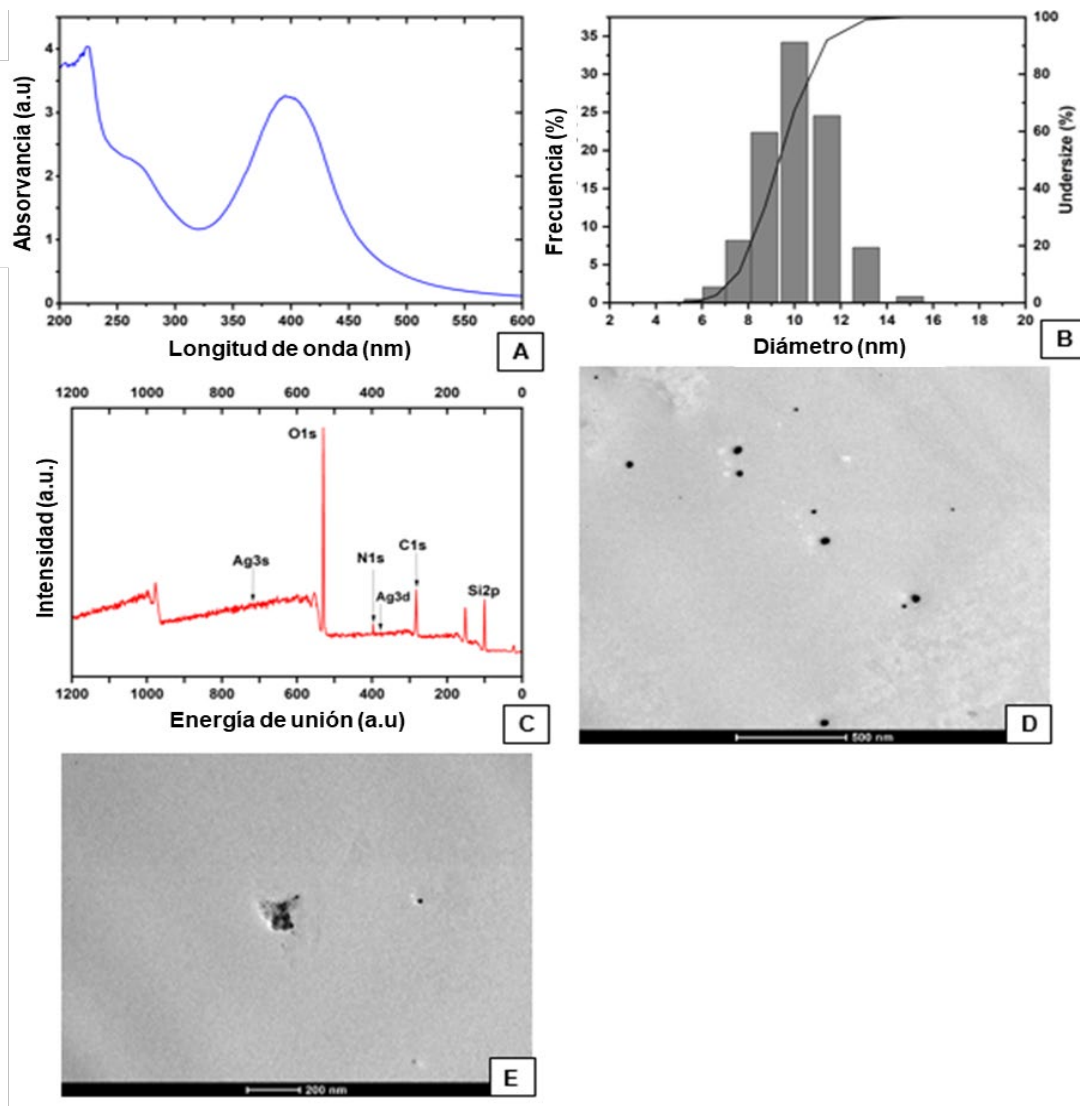
El análisis de los datos se realizó en el software SAS OnDemand for Academics (versión online). Todos los datos tabulados o graficados se expresaron como la media  $\pm$  DE (desviación estándar) de tres experimentos independientes. En los casos necesarios, para determinar diferencias en mortalidad entre tratamientos, los datos fueron transformados utilizando el arcoseno/raíz cuadrada. Se analizó la significación estadística entre los grupos tratados y control mediante la prueba de Tukey utilizando la versión 9.1.1 del software GraphPad. (San Diego, California, EE. UU.). El valor de  $p < 0,05$  se consideró estadísticamente significativo para considerar las diferencias.

---

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Caracterización de los NCPs**

Para confirmar la formación de AgNPs con cobertura polimérica, es necesario llevar a cabo su caracterización para evaluar sus aspectos funcionales.<sup>18,19</sup> En este sentido, se utilizaron las técnicas descritas en métodos las que permiten analizar de manera indirecta la concentración y el tamaño de las nanopartículas sintetizadas. En el caso de la caracterización por espectroscopía Uv - vis se evidenció como se muestra en la figura 1A, la presencia de un pico de absorbancia máximo de 3.256 en una longitud de onda de 398 nm correspondiente a NCPs de plata donde se utilizó PVP como matriz polimérica. Investigaciones anteriores,<sup>20,21</sup> emplearon PVP como agente estabilizante, y como agente reductor el borohidruro de sodio, estos registraron espectros de absorbancia en longitud de onda entre 395 a 410 nm, los cuales señalaban la presencia de AgNPs entre 395 y 398 nm dependiendo de la concentración de PVP, con picos máximos de absorbancia entre 0.42 a 1.2. Además, señalaron que a mayor concentración de PVP podría existir la formación de aglomerados además de presentar métodos de síntesis que requerían largos periodos de tiempo. Haciendo una comparación con los estudios mencionados, la presente investigación presenta concordancia con respecto a la longitud de onda de 398 nm, sin embargo, resulta muy novedoso que el pico máximo de absorbancia de 3.256 obtenido fue mayor con respecto a los picos reportados en la literatura, esto sugiere que el uso de extracto de romero (*Rosmarinus officinalis* L.) y PVP a una baja concentración produce una mayor concentración de nanopartículas, debido al efecto sinérgico que mejoran la calidad y estabilidad de las AgNPs.



**Figura 1. Caracterización de AgNPs – PVP** A) Espectro UV – Vis, el pico de absorbancia se ubica en 398nm. B.) Histograma de distribución de tamaños, media del diámetro hidrodinámico de 10.8 nm. C.) Espectro XPS completo, se observan 5 picos que indican la presencia en la muestra de carbono, nitrógeno, oxígeno, silicio y plata en diferentes configuraciones electrónicas. D.) Imágenes TEM de las AgNPs a escala de 500nm. E.) Imágenes TEM de las AgNPs a escala de 200nm.

Por otro lado, las mediciones DLS permiten determinar el tamaño y la superficie específica de las AgNPs<sup>22</sup>. Los resultados obtenidos demostraron que el tamaño promedio de las AgNPs es de 10.8 nm (Figura 1. B) con un área superficial de  $5.778 \cdot 10^6$  (cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>). El tamaño de las AgNPs obtenidas se confirmó posteriormente utilizando microscopía TEM (Figura 1 D y E).

Se observó que el uso de polímeros en la síntesis del NCP influye en el tamaño del mismo debido al efecto estabilizante, el cual evita la aglomeración, por lo que también se obtiene una distribución más uniforme de tamaños de AgNPs. El polímero PVP puede ser empleado como agente de recubrimiento, acelerando el tiempo de reacción y ayudando a controlar la nucleación para formar partículas metálicas más pequeñas.<sup>23-25</sup> De esta manera, las matrices poliméricas pueden proteger la AgNPs de la degradación y cambiar su comportamiento dinámico.<sup>26</sup> Además, el área superficial puede sugerir una mejor dispersión de las nanopartículas y una mayor interacción con el medio circundante, reflejando la formación de nanopartículas con mayor estabilidad.<sup>27</sup>

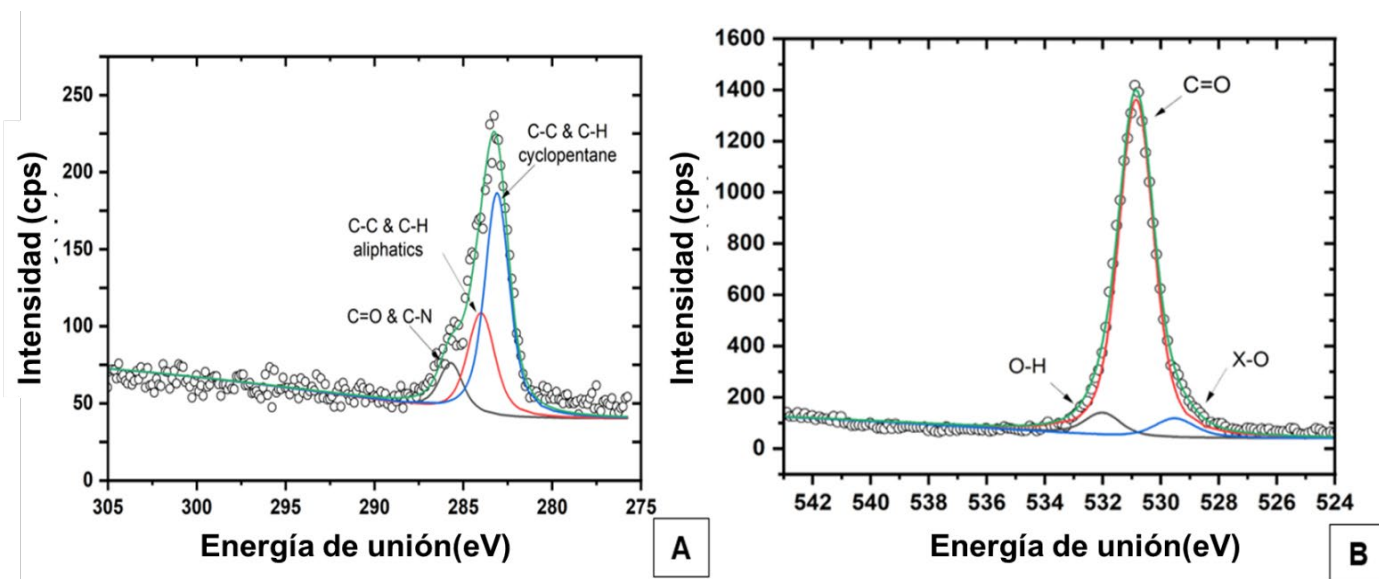
También se realizó una caracterización de las nanopartículas mediante XPS para poder observar la composición elemental de manera cualitativa y cuantitativa de las AgNPs. En la Figura 1 C se observa el espectro XPS completo en el cual se detecta la presencia de elementos como plata, oxígeno, nitrógeno, carbono y restos de silicio. Al comparar este espectro con una investigación anterior <sup>28-29</sup> se reportan picos de plata con mayor intensidad que los de esta investigación. Esto puede deberse a varios factores, como la sensibilidad del equipo, el ángulo de medición o los diferentes estados de oxidación en los que se puede encontrar el elemento.

En este trabajo, el equipo utilizado tiene un poder de penetración de solo 100 nm por lo que es posible que, debido al recubrimiento polimérico, la señal de la plata no fue captada en su totalidad debido a la poca penetración, llevando a su baja intensidad. En la Tabla 1 se presenta la composición elemental porcentual de los NCPs de esta investigación.

Elemento	%
Carbono	18,11
Nitrógeno	3,19
Oxígeno	50,37
Sodio	0
Silicio	25,99
Cloro	0,57
Plata 3d	0,11
Plata 4p	0
Plata 3s	1,66

**Tabla 1. Composición elemental porcentual del medio líquido en el que se encuentran las AgNPs – PVP.**

Como parte del análisis en XPS se procedió a registrar los espectros en alta resolución del carbono y oxígeno, los cuales permiten detectar pequeñas variaciones en la energía de enlace de los elementos debido a los entornos en los que se encuentran, pudiendo determinar de esta manera las interacciones de los elementos de este entorno. <sup>30</sup> Estos espectros se deconvolucionaron en los picos de los componentes para observar sus posiciones en cuanto a energía de enlace y poder determinar las posibles interacciones entre los componentes del medio en el que se encuentran las AgNPs. En la figura 2A se puede observar la deconvolución del C1s en la cual se muestran tres picos, dos en la región de enlaces C-C y dos en la región oxigenada, el primero se ubica en la región oxigenada, en una energía de enlace correspondiente a 285,7 eV que indican la presencia de grupos carbonilo o enlaces carbono – nitrógeno (C-N). <sup>31,32</sup> Los dos siguientes se ubican en la región C-C. El segundo pico se ubica en la energía de enlace de 284 eV que corresponde a enlaces C-C y C-H de compuestos alifáticos, este pico generalmente se ubica en una energía de enlace de 284.8 eV. El último pico se encuentra en la energía de enlace de 283,105 eV que corresponde a enlaces de ciclopentano, generalmente este pico suele ubicarse en una energía de enlace de 283,4 eV. <sup>32</sup>



**Figura 2.** Deconvolución de los espectros XPS de alta resolución. A.) Deconvolución del C1s, se observan 3 picos asociados a enlaces que forma el carbono con otros elementos. B.) Deconvolución del O1s, se observan 3 picos que corresponden a los enlaces que forma el oxígeno con otros elementos, hay concordancia de enlaces entre este y el carbono.

Por otro lado, en la Figura 2B se puede observar la deconvolución del O1s que presenta 3 picos. El primero se ubica en una energía de enlace de 532 eV que corresponden a grupos éter o hidroxilo unidos a compuestos alifáticos, este pico suele encontrarse entre 532.5 – 532.9 eV. El segundo pico se encuentra en una energía de enlace de 530.85 eV el cual corresponde a grupos carbonilo, lactonas o carboxilo, el cual es concordante con el tipo de enlace mostrado en la deconvolución del C1s, la ubicación común de este es entre los 531.3 – 532.6 eV<sup>32</sup>. El último pico se encuentra en una energía de enlace de 529,52 eV el cual corresponde a óxidos metálicos que se encuentra dentro del rango reportado de 529 – 530 eV.<sup>33</sup>

Los desplazamientos de las energías de enlace en los picos deconvolucionados pueden estar influenciados por factores como el tamaño de las nanopartículas, interacciones con el medio, deformaciones en la red cristalina del material o los efectos de relajación del material en el estado final después de la excitación por rayos X.<sup>34</sup> En este caso, la interacción entre las cargas parciales positivas de las AgNPs y las cargas parciales negativas de los grupos carbonilo del polímero PVP, la formación de complejos con los grupos carbonilo o el nitrógeno del anillo de la PVP con la plata<sup>35</sup> y el tamaño de las nanopartículas, pueden explicar los desplazamientos observados en los resultados de esta investigación.

## Estabilidad de los NCPS en el tiempo.

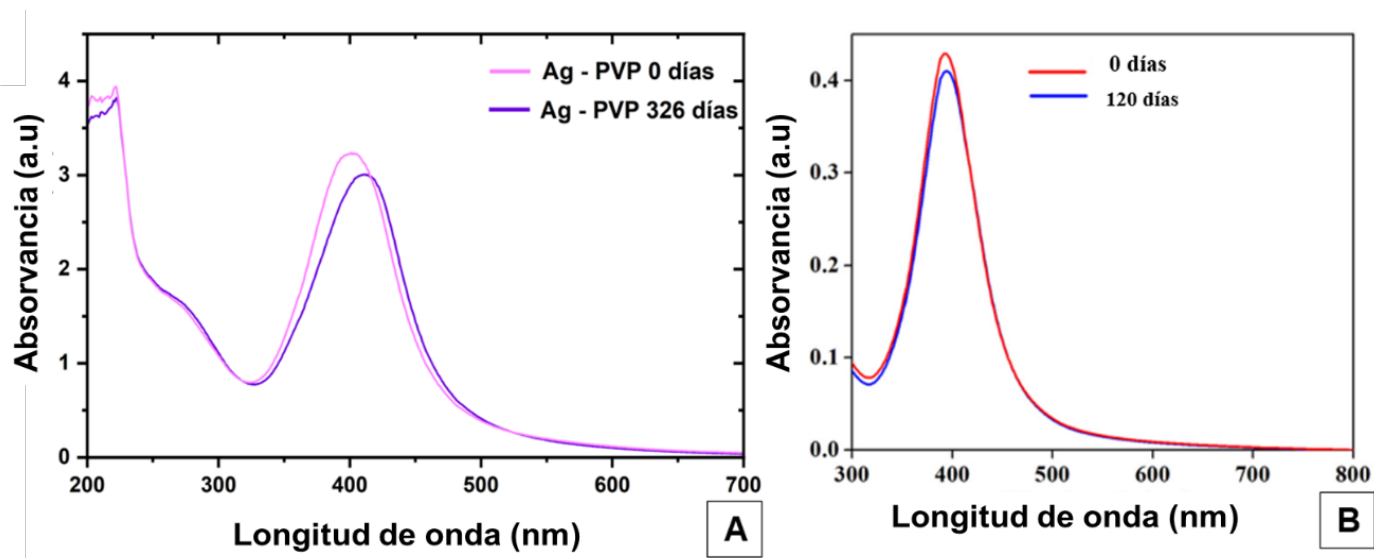


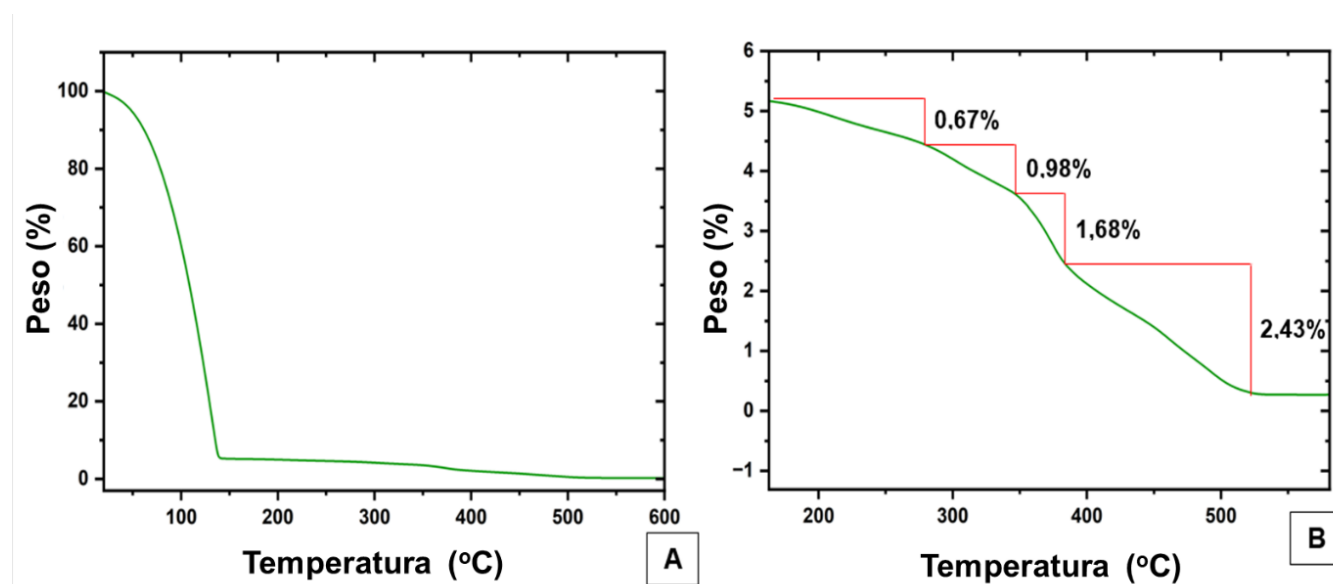
Figura 3. Espectro UV – Vis AgNPs –PVP A.) Espectros UV – Vis de AgNPS – PVP en día 0 y después de 326 días. B.) Espectros UV – Vis de AgNPS – PVP después de 4 meses publicado por <sup>36</sup>.

El objetivo final del NCP obtenido es de uso agrícola por lo que la estabilidad en tiempo real es un parámetro importante para evaluar por lo que se estudió en esta investigación la estabilidad de los NCPs obtenidos por un periodo de 326 días. Como se muestra en la Figura 3 (A), en este periodo de tiempo se observó una disminución en la absorbancia de 0.2295 unidades, pasando de 3.2371 a 3.0076 unidades. Además, se registró un ligero desplazamiento del pico de absorbancia, de 401 nm a 414 nm. Estos pequeños cambios de absorbancia en el gran periodo de tiempo ensayado indican que los NCPs son altamente estables, conservando su integridad y concentración incluso por largos periodos de tiempo. Un comportamiento similar fue reportado por otras investigaciones <sup>36</sup>, donde también evaluaron la estabilidad de nanopartículas de plata recubiertas con PVP pero solo durante 120 días (4 meses), sin observar una disminución significativa en la absorbancia como se observa en la Figura 3 (B). No obstante, nuestro estudio incluyó un período de tiempo más largo y se realizó en condiciones de no refrigeración, lo que resulta una condición más cercana a las condiciones donde serán utilizados estos NCPs. Las pequeñas variaciones en la longitud de onda podrían estar relacionadas con pequeños cambios en las propiedades ópticas de la materia orgánica disuelta. <sup>37</sup> En este caso, dado que las AgNPs fueron sintetizadas mediante química verde, es probable que contengan residuos de materia orgánica del extracto de romero, lo cual podría explicar el desplazamiento observado en la longitud de onda, lo cual no afecta a la integridad de estos NCPs.

## Estabilidad térmica de los NCPs

Aparte de estudiar la estabilidad en el tiempo, también se corroboró la estabilidad térmica de los NCPs mediante un análisis termogravimétrico. La Figura 4A muestra el termograma de estabilidad, donde se observa una gran curva de descenso que refleja la pérdida de masa de 94,24% entre un rango de temperatura de 21 a 142 °C. En el caso de la Figura 4B, se realizó un acercamiento del termograma para evidenciar los descensos en la curva de estabilidad entre un rango de 150 a 650 °C, donde se presentaron cuatro variaciones importantes

que representan la degradación de los compuestos orgánicos presentes en la muestra. En primera instancia se observó un descenso de la curva reflejando la pérdida de masa de 0,67% entre 151 y 266.5 °C, además se observó un decrecimiento reflejado en un porcentaje de 0.98% a un rango de 266.5 y 350 °C por otro lado, una curva de degradación representó un porcentaje de masa de 1,68% entre 350 y 393.2 °C, y finalmente la curva más pronunciada a una temperatura de 400 a 520 °C se mostró con un porcentaje de 2.43%.



**Figura 4.** Curva de estabilidad de las AgNPs – PVP a una atmósfera oxidante A.) Pérdida de masa por evaporación de agua en el intervalo de 16 °C a 140 °C. B.) Pérdida de masa por degradación de la PVP en diferentes intervalos de temperatura.

Estos resultados concuerdan con investigaciones previas<sup>38,39</sup> donde se analizó térmicamente la presencia del polímero PVP en las AgNPs, mostrando una primera pérdida de peso hasta 140 °C debido a la evaporación del agua adsorbida y la humedad que hace referencia al medio de las AgNPs, en el segundo descenso de la curva hasta 251 °C observaron la pérdida del disolvente residual, a partir del tercer descenso de la curva se observa la descomposición de PVP que se encuentra alrededor de las AgNPs de 250 hasta 500 °C. Se debe recalcar que el peso molecular empleado en su investigación fue de 40000 a diferencia del empleado en esta investigación que fue de 10000. La pérdida de masa de PVP entre 250 y 500°C depende del peso molecular empleado en la síntesis.<sup>38,39</sup>

Sin embargo, otras investigaciones reportan que las AgNPs recubiertas con PVP sintetizadas por métodos químicos no resultaron estables<sup>40</sup>. En esas investigaciones se redujo el nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ ) con borohidruro de sodio ( $\text{NaBH}_4$ ), utilizando PVP con dos pesos moleculares diferentes (40k y 55k) como agentes estabilizantes.

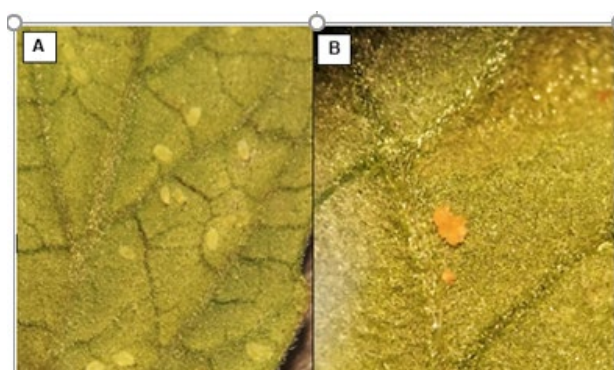
### Carácter Insecticida y bactericida de los NCPs en condiciones de laboratorio.

En cuanto al carácter insecticida, se observa en la Tabla 2 que 10 días después de la aplicación del nanocomposito se obtuvo un porcentaje de mortalidad de 98.0, 97.84 y 96.1 para las concentraciones de 64 ppm, 32 ppm y 16 ppm respectivamente. Después de 10 días también se ve una afectación en los huevitos, los cuales cambiaron de color transparente a un color café oscuro como se muestra en la figura 5B. También en

la tabla 2 se observa que ya a las 24 y 48 horas de aplicado tanto el nanocomposito como sus diluciones hay un efecto letal importante sobre las larvas y ninfas presentes en las hojas.

Concentración	24 h	48 h	10 días
64 ppm	47.2 ± 2.4 a	90.66 ± 1.65 a	98.0 ± 0.00 a
32 ppm	45.83 ± 1.26b	87.40 ± 1.08 a	97.84 ± 0.76 a
16 ppm	34.87 ± 1.56 cba	82.45 ± 1.35 ba	96.10 ± 1.95 a

**Tabla 2.** % de Mortalidad de diferentes estadios de mosca blanca después de 24, 48 horas y 10 días posterior a la aplicación sobre las hojas del nanocompósito (64 ppm) y diluciones 1:2 y 1:4 respectivamente. Los datos porcentuales se transformaron por raíz cuadrada de arcoseno para su posterior procesamiento. Los datos tabulados corresponden a las medias de 4 réplicas ± una desviación estándar. Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes (Tukey  $p < 0,05$ ).



**Figura 5.** Efecto insecticida y bactericida de las AgNPs – PVP. A.) Presencia de individuos vivos de mosca blanca en la hoja de tomate. B) Presencia de individuos muertos de mosca blanca después de 10 días de aplicación con cambio de coloración de transparente a color café indicativo de mortalidad.

La síntesis verde de AgNPs, utilizando plantas como agentes reductores y captadores, ha mostrado provocar mortalidad en casi todos los estadios de los mosquitos, es decir huevo, larva y adulto, además de producir toxicidad aguda, propiedades fumigantes, antialimentarias, repelentes y atrayentes, actuando como inhibidores reproductivos para muchas especies de plagas agrícolas y de productos almacenados, en una dosis más baja que las nanopartículas sintetizadas químicamente.<sup>41</sup> Sin embargo, la información precisa sobre los mecanismos de acción de las nanopartículas contra insectos y ácaros es aún muy limitada. Se ha demostrado que las nanopartículas de plata tienen un impacto significativo sobre las enzimas antioxidantes y desintoxicantes de los insectos, lo que provoca estrés oxidativo y muerte celular.<sup>4,42</sup> Las nanopartículas de plata también redujeron la actividad de la acetilcolinesterasa en algunos insectos. Las nanopartículas metálicas en general pueden unirse a proteínas y ácidos nucleicos, respectivamente, lo que lleva a una disminución de la permeabilidad de la membrana y, por lo tanto, a la desnaturalización de orgánulos y enzimas, seguida de la muerte celular. Además, las nanopartículas de Ag regulan hacia arriba y hacia abajo genes clave de insectos, reduciendo la síntesis de proteínas y la liberación de gonadotropinas, lo que provoca daños en el desarrollo y fallos reproductivos. Las propiedades insecticidas de las AgNP se pueden atribuir principalmente a su morfología, dimensiones y alto poder cubriente, lo que favorece su penetración en el cuerpo del insecto.<sup>43</sup> Una de las ventajas de emplear AgNP como agente de control es su bajo riesgo de desarrollar resistencia en el uso prolongado.<sup>44</sup>

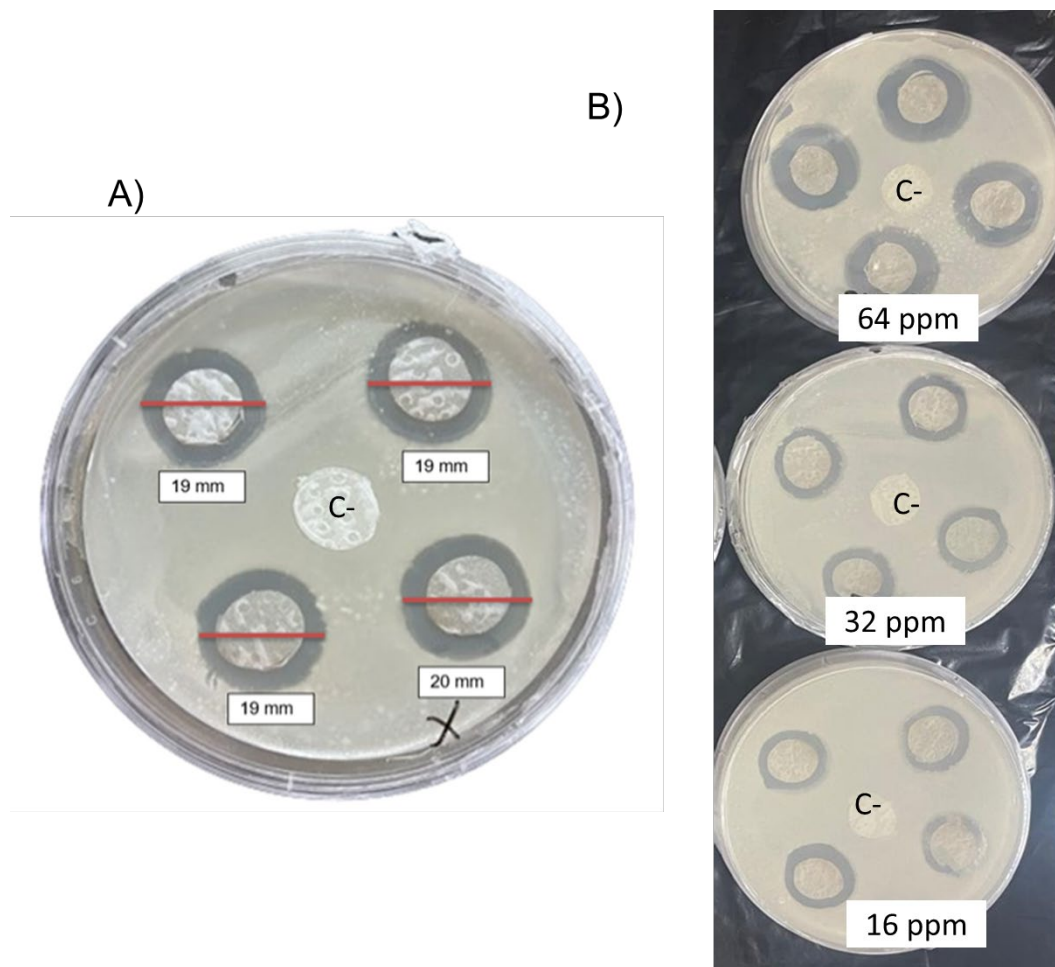
Escasos reportes existen relacionados con la acción de nanocompositos de plata frente a diferentes estadios de la mosca blanca (*Bemisia tabaci*), por lo que este trabajo pudiera ser un referente para estudios posteriores de los mecanismos de acción de este nanocomposito frente a esta plaga tan importante y que ocasiona grandes pérdidas sobre todo, en cultivos orgánicos donde no se utilizan pesticidas químicos para su control, haciendo

un análisis de los genes que se expresan o reprimen como consecuencia del tratamiento con este nanocomposito.

En la tabla 3 se muestran los resultados del método de difusión en disco de agar como se describe en métodos para evaluar efecto inhibitorio del nanocomposito y sus diluciones en el crecimiento de 3 bacterias, *Bacillus amyloliquefaciens* (bacteria no patógena), *Pseudomonas syringae* causante de la peca bacteriana y *Xanthomonas spp* causante de la mancha bacteriana del tomate. Como resultado se presentan los valores de la zona de inhibición obtenidos (en mm, de diámetro) luego de aplicar en los discos de filtro 50 uL de la solución de 64 ppm del nanocomposito y dos diluciones 1:2 y 1:4 del mismo respectivamente. En todos los casos hubo una inhibición del crecimiento la cual fue más acentuada en la variante no diluida del nanocomposito correspondiente a 64 ppm aunque en los resultados de las variantes de las diluciones 1:2 y 1:4 también se observó inhibición del crecimiento.

Microorganismo	Diámetro de la zona de inhibición (mm) Nanocomposito sin diluir (20 ul de la solución 64 ppm en cada disco)	Diámetro de la zona de inhibición (mm). Dilución 1:2 (20 ul de la solución 32 ppm en cada disco)	Diámetro de la zona de inhibición (mm). Dilución 1:4 (20 ul de la solución 16 ppm en cada disco)
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	19,2 ± 0.1	8,2 ± 0,5	4,3±0,01
<i>Pseudomonas syringae</i>	18,5 ± 0.05	8,0 ± 0,05	4,5±0,01
<i>Xanthomonas spp</i>	18 ± 0,01	7,5± 0,5	4,0±0,01
Control	0	0	0

**Tabla 3.** Inhibición del crecimiento de 3 aislados bacterianos correspondientes a *Bacillus amyloliquefaciens*, *Pseudomonas syringae* y *Xanthomonas spp* luego de la aplicación del nanocomposito (32 ppm) y sus diluciones 1:2 y 1:4. La actividad inhibitoria está representada por el diámetro del halo de inhibición del crecimiento (mm) incluyendo el área del disco como muestra la figura ilustrativa 6 correspondiente al experimento realizado utilizando la bacteria *Bacillus amyloliquefaciens* y como se realizó la medición de halos. Los datos tabulados corresponden a los valores medios de las 4 réplicas presentes en cada placa Petri +- una desviación estándar.



**Figura 6. Efecto bactericida del nanocomposito frente a la bacteria *Bacillus amyloliquefasiens*. A) Medición de los halos de inhibición. B) Halos de inhibición al utilizar diferentes diluciones del nanocomposito (64, 32 y 16 ppm respectivamente). Al centro el control negativo C(-) disco con agua destilada. Los demás discos corresponden a 4 réplicas de la aplicación del nanocomposito utilizando las diferentes diluciones**

Los mecanismos de inhibición exactos de las AgNPs contra las bacterias aún permanecen desconocidos. Sin embargo, hay algunos investigadores que proponen que la acción de las AgNP sobre las bacterias puede deberse a su capacidad para penetrar en la célula,<sup>45</sup> la formación de radicales libres,<sup>46, 47</sup> la inactivación de proteínas en la célula por iones de plata y la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS).<sup>48</sup> Además, también hay algunos otros factores que influyen en la acción bactericida de las AgNPs, como la concentración de AgNP, el tipo de bacterias,<sup>49</sup> la forma y tamaño de AgNPs.<sup>50</sup>

## CONCLUSIONES

Se estandariza un método de síntesis verde utilizando extracto de romero (*Rosmarinus officinalis* L.) como agente reductor, con el cual se obtienen nanopartículas de plata de tamaños aptos para usos agronómicos con diámetros promedio de 10.8 nm, las cuales se encuentran recubiertas por una capa de PVP mediante la interacción de las cargas parciales positivas de la superficie de la nanopartícula y las cargas parciales negativas

del grupo carbonilo de la PVP o también mediante la formación de complejos con el nitrógeno del anillo de la PVP. Este hecho ayuda a que las nanopartículas no formen aglomerados y permanezcan estables a temperatura ambiente sin necesidad de refrigeración. Adicionalmente se corrobora que tienen una alta estabilidad térmica incluso a 500 °C. En cuanto a los ensayos pesticidas, el nanocomposito logra controlar a la mosca blanca en diferentes estadios a nivel de laboratorio con un promedio de mortalidad de 98 % de individuos después de 10 días de su aplicación. Por otro lado, se muestra que el nanocomposito logra inhibir el crecimiento de *Bacillus amyloliquefaciens*, *Pseudomonas syringae* y *Xanthomonas* spp, mostrando zonas de inhibición de hasta 20 mm de diámetro. Este nanocomposito posee las propiedades necesarias para ser considerado como materia prima de un potencial nanobiopesticida por lo que se propone a futuro realizar experimentos de control de plagas y enfermedades a nivel de invernaderos para poder evaluar estos efectos del nanocomposito a nivel productivo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los Dres. Alexis Debut de la ESPE, Julio Chacón y Zailmar Morales de Yachay Tech. por sus aportes en las mediciones en microscopía TEM y análisis XPS así como en los análisis termogravimétricos llevados a cabo durante la caracterización del nanocomposito en el marco de este trabajo de tesis.

## REFERENCIAS

1. Kale SK, Parishwad GV, Patil ASN. Emerging agriculture applications of silver nanoparticles. *ES Food Agrofor*. 2021;3(March):17–22.
2. Nie P, Zhao Y, Xu H. Synthesis, applications, toxicity and toxicity mechanisms of silver nanoparticles: A review. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2023;253:114636. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114636>
3. Pryshchepa O, Pomastowski P, Buszewski B. Silver nanoparticles: Synthesis, investigation techniques, and properties. *Adv Colloid Interface Sci*. 2020;284:102246. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102246>
4. Benelli G, Pavela R. Beyond mosquitoes—Essential oil toxicity and repellency against bloodsucking insects. *Ind Crops Prod* [Internet]. 2018 Mar 26;117:382–92. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.072>
5. Alabdallah NM, Hasan MM. Plant-based green synthesis of silver nanoparticles and its effective role in abiotic stress tolerance in crop plants. *Saudi J Biol Sci*. 2021;28(10):5631–9. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.05.081>
6. Alharbi NS, Alsubhi NS, Felimban AI. Green synthesis of silver nanoparticles using medicinal plants: Characterization and application. *J Radiat Res Appl Sci*. 2022;15(3):109–24. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2022.06.012>
7. Ijaz M, Zafar M, Iqbal T. Green synthesis of silver nanoparticles by using various extracts: A review. *Inorg Nano-Met Chem*. 2020;51(5):744–55. <https://doi.org/10.1080/24701556.2020.1808680>

8. Ying S, Guan Z, Ofoegbu PC, Clubb P, Rico C, He F, et al. Green synthesis of nanoparticles: Current developments and limitations. *Environ Technol Innov.* 2022;26:102336.
9. Dikshit P, Kumar J, Das A, Sadhu S, Sharma S, Singh S, et al. Green synthesis of metallic nanoparticles: Applications and limitations. *Catalysts.* 2021;11:902.
10. Pal G, Rai P, Pandey A. Chapter 1—Green synthesis of nanoparticles: A greener approach for a cleaner future. In: Shukla AK, Iravani S, editors. *Micro and Nano Technologies.* Amsterdam, The Netherlands: Elsevier; 2019. p. 1–26. ISBN 978-0-08-102579-6.
11. Lavanya K, Kalaimurugan D, Shivakumar MS, Venkatesan S. Gelatin stabilized silver nanoparticle provides higher antimicrobial efficiency as against chemically synthesized silver nanoparticle. *J Clust Sci.* 2020;31(1):265–75. <https://doi.org/10.1007/s10876-019-01644-2>
12. Urrejola MC, Soto LV, Zumarán CC, Peñaloza JP, Álvarez B, Fuentesvilla I, et al. Sistemas de nanopartículas poliméricas II: Estructura, métodos de elaboración, características, propiedades, biofuncionalización y tecnologías de auto-ensamblaje capa por capa (Layer-by-Layer Self-Assembly). *Int J Morphol.* 2018;36(4):1463–71. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-95022018000401463>
13. Dutta T, Chattopadhyay AP, Mandal M, Ghosh NN, Mandal V, Das M. Facile green synthesis of silver bionanocomposite with size-dependent antibacterial and synergistic effects: A combined experimental and theoretical study. *J Inorg Organomet Polym Mater.* 2020;30(5):1839–51. <https://doi.org/10.1007/s10904-019-01332-8>
14. Neto FNS, Morais LA, Gorup LF, Ribeiro LS, Martins TJ, Hosida TY, et al. Facile synthesis of PVP-coated silver nanoparticles and evaluation of their physicochemical, antimicrobial, and toxic activity. *Colloids Interfaces.* 2023;7(4):Article 4. <https://doi.org/10.3390/colloids7040066>
15. Pardo L, Arias J, Molleda P. Elaboración de nanopartículas de plata sintetizadas a partir de extracto de hojas de romero (*Rosmarinus officinalis* L.) y su uso como conservante. *La Granja Rev Cienc Vida.* 2022;35(1):45–58. <http://doi.org/10.17163/lgr.n35.2022.04>
16. Singh J, Kumar A, Nayal AS, Vikal S, Shukla G, Singh A, et al. Comprehensive antifungal investigation of green synthesized silver nanoformulation against four agriculturally significant fungi and its cytotoxic applications. *Sci Rep [Internet].* 2024 Mar 11;14(1). Available from: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56619-9>
17. Murray DK, Bremer H. Control of spoT-dependent ppGpp Synthesis and Degradation in *Escherichia coli*. *Journal of Molecular Biology [Internet].* 1996 May 1;259(1):41–57. Available from: <https://doi.org/10.1006/jmbi.1996.0300>
18. Archana ER. Phytochemical analysis, bioactivity screening and characterization of biosynthesized silver nanoparticles on selected species of *Aglaia Louriero* (Meliaceae) [PhD Thesis]. University of Calicut; 2020.
19. Sabir S, Arshad M, Ilyas N, Naz F, Amjad MS, Malik NZ, et al. Protective role of foliar application of green-synthesized silver nanoparticles against wheat stripe rust disease caused by *Puccinia striiformis*. *Green Process Synth.* 2022;11(1):29–43. <https://doi.org/10.1515/gps-2022-0004>
20. Garcia AM, Bizeto MA, Ferrari VB, Okamoto DN, de Vasconcellos SP, Camilo FF. Direct evaluation of microbial growth dynamics and colloidal stability of silver nanoparticles stabilized by poly(vinyl pyrrolidone) and poly(vinyl alcohol). *J Nanopart Res.* 2020;22(6):137. <https://doi.org/10.1007/s11051-020-04863-1>

21. Haque MN, Kwon S, Cho D. Formation and stability study of silver nanoparticles in aqueous and organic medium. *Korean J Chem Eng.* 2017;34(7):2072–8. <https://doi.org/10.1007/s11814-017-0096-z>
22. Babick F. Dynamic light scattering (DLS). In: Hodoroaba V-D, Unger WES, Shard AG, editors. *Characterization of Nanoparticles.* Elsevier; 2020. p. 137–72. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814182-3.00010-9>
23. Almatroudi A. Silver nanoparticles: Synthesis, characterisation and biomedical applications. *Open Life Sci.* 2020;15(1):819–39. <https://doi.org/10.1515/biol-2020-0094>
24. Utkarsh, Hegab H, Tariq M, Syed NA, Rizvi G, Pop-Iliev R. Towards analysis and optimization of electrospun PVP (Polyvinylpyrrolidone) nanofibers. *Adv Polym Technol.* 2020;2020:4090747. <https://doi.org/10.1155/2020/4090747>
25. Yuan Q, Golden TD. A novel method for synthesis of clay/polymer stabilized silver nanoparticles. *Surf Interfaces.* 2020;20:100620. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100620>
26. Mandal M, Banerjee I, Mandal M. Nanoparticle-mediated gene therapy as a novel strategy for the treatment of retinoblastoma. *Colloids Surf B Biointerfaces.* 2022;220:112899. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2022.112899>
27. Sharifzadeh E. Evaluating the dependency of polymer/particle interphase thickness to the nanoparticles content, aggregation/agglomeration factor and type of the exerted driving force. *Iran Polym J.* 2021;30(10):1063–72. <https://doi.org/10.1007/s13726-021-00956-3>
28. Wu C, Mosher BP, Lyons K, Zeng T. Reducing ability and mechanism for polyvinylpyrrolidone (PVP) in silver nanoparticles synthesis. *J Nanosci Nanotechnol.* 2010;10(4):2342–7. <https://doi.org/10.1166/jnn.2010.1915>
29. Shard AG. Practical guides for x-ray photoelectron spectroscopy: Quantitative XPS. *J Vac Sci Technol A.* 2020;38(4):041201. <https://doi.org/10.1116/1.5141395>
30. Sprenger D, Anderson O. Deconvolution of XPS spectra. *Fresenius J Anal Chem.* 1991;341(1):116–20. <https://doi.org/10.1007/BF00322120>
31. Xiao, S., Xu, P., Peng, Q., Chen, J., Huang, J., Wang, F., & Noor, N. (2017). Layer-by-Layer Assembly of Polyelectrolyte Multilayer onto PET Fabric for Highly Tunable Dyeing with Water Soluble Dyestuffs. *Polymers*, 9(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/polym9120735>
32. Smith, M., Scudiero, L., Espinal, J., McEwen, J.-S., & Garcia-Perez, M. (2016). Improving the deconvolution and interpretation of XPS spectra from chars by ab initio calculations. *Carbon*, 110, 155–171. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.09.012>
33. Nohira, H., Tsai, W., Besling, W., Young, E., Petry, J., Conard, T., Vandervorst, W., De Gendt, S., Heyns, M., Maes, J., & Tuominen, M. (2002). Characterization of ALCVD-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZrO<sub>2</sub> layer using X-ray photoelectron spectroscopy. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 303(1), 83–87. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(02\)00970-5](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(02)00970-5)
34. Baer, D. R., & Engelhard, M. H. (2010). XPS analysis of nanostructured materials and biological surfaces. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 178–179, 415–432. <https://doi.org/10.1016/j.elspec.2009.09.003>
35. Wang, H., Qiao, X., Chen, J., Wang, X., & Ding, S. (2005). Mechanisms of PVP in the preparation of silver nanoparticles. *Materials Chemistry and Physics*, 94(2–3), 449–453. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.05.005>

36. Shanmugaraj, K., Sasikumar, T., Campos, C. H., Ilanchelian, M., Mangalaraja, R. V., & Torres, C. C. (2020). Colorimetric determination of cysteamine based on the aggregation of polyvinylpyrrolidone-stabilized silver nanoparticles. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 236, 118281. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.118281>
37. Tipping, E., Corbishley, H. T., Koprivnjak, J.-F., Lapworth, D. J., Miller, M. P., Vincent, C. D., & Hamilton-Taylor, J. (2009). Quantification of natural DOM from UV absorption at two wavelengths. *Environmental Chemistry*, 6(6), 472-476. <https://doi.org/10.1071/EN09090>
38. Kumar, M., & Devi, Dr & Kumar, A. (2017). Structural analysis of PVP capped silver nanoparticles synthesized at room temperature for optical, electrical and gas sensing properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 28. 10.1007/s10854-016-6157-y.
39. Mirzaei A, Janghorban K, Hashemi B, Bonyani M, Leonardi SG, Neri G. Caracterización y estudios ópticos de nanopartículas de plata recubiertas con PVP. *J Nanostruct Chem*. 2017;7(1):37–46. doi: 10.1007/s40097-016-0212-3
40. Rónavári A, Bélteky P, Boka E, Zakupszky D, Igaz N, Szerencsés B, Pfeiffer I, Kónya Z, Kiricsi M. Nanopartículas de plata recubiertas de polivinilpirrolidona: consecuencias coloidales, químicas y biológicas Consecuencias bajo la estabilización de biestérico *Int J Mol Ciencia*. 2021;22(16):8673. doi: 10.3390/ijms22168673
41. Pathipati UR, Kanuparthi PL. Nanopartículas de plata para el control de insectos: bioensayos y mecanismos. En: *Nanomateriales de plata para aplicaciones agroalimentarias*. 2021. pág. 471–494.
42. Benelli G, Beier JC. Desafíos actuales del control de vectores en la lucha contra la malaria. *Acta Trop*. 2017;174:91–96.
43. Sankar MV, Abideen S. Efecto pesticida de nanopartículas de plomo y plata sintetizadas verdes utilizando *Avicennia marina* contra la plaga del almacenamiento de granos *Sitophilus oryzae*. *Int J Nanomater Biostruct*. 2015;5:32–39.
44. Kamil D, Prameeladevi T, Ganesh S, Prabakharan N, Nareshkumar R, Thomas SP. Síntesis verde de nanopartículas de plata por el hongo entomopatógeno *Beauveria bassiana* y su bioeficacia contra el pulgón de la mostaza (*Lipaphis erysimi* Kalt.). *Indio J Exp Biol*. 2017;55:555–561.
45. Sondi I, Salopek-Sondi B. Nanopartículas de plata como agente antimicrobiano: un estudio de caso sobre *E. coli* como modelo para bacterias gramnegativas. *J Ciencia de la interfaz coloidal*. 2004;275:177–182. doi: 10.1016/j.jcis.2004.02.012
46. Danilczuk M, Lund A, Sadlo J, Yamada H, Michalik J. Resonancia de espín electrónico de conducción de pequeñas partículas de plata. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*. 2006;63:189–191. doi: 10.1016/j.año.2005.05.002
47. Kim JS, Kuk E, Yu KN, Kim JH, Park SJ, Lee HJ, et al. Efectos antimicrobianos de las nanopartículas de plata. *Nanomedicina*. 2007;3:95–101. doi: 10.1016/j.nano.2006.12.001
48. Dakal TC, Kumar A, Majumdar RS, Yadav V. Base mecanicista de las acciones antimicrobianas de las nanopartículas de plata. *Frente Microbiol*. 2016;7:1831. doi: 10.3389/fmicb.2016.01831
49. Zhang M, Zhang K, De Gusseme B, Verstraete W, Field R. El rendimiento antibacteriano y antiincrustante de las nanopartículas de plata biogénicas de *Lactobacillus fermentum*. *Bioincrustación*. 2014;30:347–357. doi: 10.1080/08927014.2013.873419
50. Meire M, Coenye T, Nelis H, De Moor R. Evaluación de la irradiación con Nd:YAG y Er:YAG, la terapia fotodinámica antibacteriana y el tratamiento con hipoclorito de sodio en biopelículas de *Enterococcus faecalis*. *Int Endod J*. 2012;45:482–491. doi: 10.1111/j.1365-2591.2011.02000.x

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

**LT, AJP, PR:** Síntesis de nanopartículas, análisis de espectro XPS, escritura de la versión inicial del artículo, análisis estadísticos, **VAA:** Caracterización UV-Vis y DLS, **CC, AI:** Ensayos bactericidas, **GAC, JAV, PL, LMR:** Ensayos bactericidas e insecticidas, **LET y CMN:** Diseño de todos los experimentos, desarrollo de la formulación del nanocomposito para los bioensayos, ensayos bactericidas e insecticidas, escritura del artículo final.

**Funding:** This work was partially supported by funding from the IdeaBIO SENESCYT 2024-25 project.

Received: October 23, 2024 / Accepted: November 30, 2024 / Published: December 15, 2024

**Citation:** Poaquiza A, Toapanta L, Criollo GA, Velasco JA, Aguirre VA, Caiza-Valencia C, et al. Green synthesis and characterization of silver nanoparticles stabilized with a biodegradable polymer for agricultural applications in the sustainable control of pests and diseases. Bionatura journal. 2024;1(4):23. doi: 10.70099/BJ/2024.01.04.23.

**Additional information** Correspondence should be addressed to letrujillo3@espe.edu.ec

**Peer review information.** Bionatura thanks anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work using <https://reviewerlocator.webofscience.com/>

**ISSN.3020-7886**

All articles published by Bionatura Journal are made freely and permanently accessible online immediately upon publication, without subscription charges or registration barriers.

**Publisher's Note:** Bionatura Journal stays neutral concerning jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

**Copyright:** © 2024 by the authors. They were submitted for possible open-access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).