

Ecological Nanofertilization: Evaluation of Green Synthesis Silver Nanoparticles on the Germinative Development of Quinoa Seeds

David Asmat-Campos, Dr.^{1,2}, Luisa Juárez-Cortijo, MSc.², Daniel Delfín-Narciso, MSc.², Renny Nazario-Naveda, MSc.³, Moisés Gallozzo-Cárdenas, MSc.⁴

¹ Universidad Privada del Norte, Dirección de Investigación, Innovación & Responsabilidad Social, Trujillo, Perú, ² Grupo de Investigación en Ciencias Aplicadas y Nuevas Tecnologías, Universidad Privada del Norte, Trujillo, Perú,

³ Universidad Autónoma del Perú, ⁴ Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad César Vallejo, Trujillo 13001, Perú

Abstract- The research addresses sustainable nanofertilization and its impacts on the germination process of quinoa seeds. The study focuses on the utilization of silver nanoparticles produced through green synthesis, highlighting the importance of eco-friendly methods in agricultural nanotechnology. Through detailed evaluations and statistical analysis, it examines how these nanoparticles affect the initial growth of quinoa seeds. The results provide essential information on the effectiveness of ecological nanofertilization in promoting the germinative development of this key crop. This study emerges as a valuable contribution to the forefront of agricultural nanotechnology, emphasizing its direct focus on actively seeking sustainable solutions to optimize agricultural productivity. By delving into the intrinsic advantages of silver nanoparticles obtained through green synthesis, the article provides an enlightening insight into the practical implementation of nanofertilization in quinoa cultivation. This approach not only underscores technical innovation but also highlights the immediate and long-term relevance of these practices within the framework of ecological and sustainable agriculture.

Keywords - Ag nanoparticles, green synthesis, germination, quinoa, *Chenopodium quinoa*.

Digital Object Identifier:
ISSN, ISBN:
DO NOT REMOVE

Nanofertilización Ecológica: Evaluación de nanopartículas de plata de síntesis verde en el desarrollo germinativo de semillas de Quinoa

David Asmat-Campos, Dr.^{1,2}, Luisa Juárez-Cortijo, MSc.², Daniel Delfín-Narciso, MSc.², Renny Nazario-Naveda, MSc.³, Moisés Gallozzo-Cárdenas, MSc.⁴

¹ Universidad Privada del Norte, Dirección de Investigación, Innovación & Responsabilidad Social, Trujillo, Perú, ² Grupo de Investigación en Ciencias Aplicadas y Nuevas Tecnologías, Universidad Privada del Norte, Trujillo, Perú,

³ Universidad Autónoma del Perú, ⁴ Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad César Vallejo, Trujillo 13001, Perú.

Abstract– *La investigación aborda la nanofertilización sostenible y sus impactos en el proceso de germinación de semillas de quinoa. El estudio se enfoca en la utilización de nanopartículas de plata producidas mediante síntesis verde, destacando la importancia de métodos eco-amigables en la nanotecnología agrícola. A través de evaluaciones detalladas y análisis estadísticos, se examina cómo estas nanopartículas afectan el crecimiento inicial de las semillas de quinoa. Los resultados ofrecen información esencial sobre la eficacia de la nanofertilización ecológica en la promoción del desarrollo germinativo de este cultivo clave. Este estudio emerge como una valiosa contribución a la vanguardia de la nanotecnología agrícola, destacando su enfoque directo en la búsqueda activa de soluciones sostenibles para optimizar la productividad agrícola. Al profundizar en las ventajas intrínsecas de las nanopartículas de plata obtenidas por síntesis verde, el artículo proporciona una visión esclarecedora sobre la implementación práctica de la nanofertilización en el cultivo de quinoa. Este enfoque no solo subraya la innovación técnica, sino que también resalta la pertinencia inmediata y a largo plazo de estas prácticas en el marco de la agricultura ecológica y sostenible.*

Keywords- Nanopartículas de Ag, síntesis verde, germinación, quinoa, *Chenopodium quinoa*.

I. INTRODUCCIÓN

La quinoa (*Chenopodium quinoa*) es un pseudocereal de alto valor nutricional que ha ganado reconocimiento mundial por sus beneficios para la salud y su versatilidad en la alimentación. Su importancia radica en ser una fuente completa de proteínas, rica en aminoácidos esenciales, vitaminas y minerales, convirtiéndola en un componente valioso para dietas equilibradas. Además, la quinoa es resistente a condiciones ambientales adversas, lo que la hace una opción sostenible para el cultivo en diversas regiones del mundo [1].

La nanotecnología es actualmente un campo de mucho interés debido a las aplicaciones de los materiales nanométricos por sus propiedades únicas, desde la medicina hasta la agricultura [2], [3].

Existen diversos mecanismos para la obtención de nanopartículas; entre ellos, la síntesis verde se muestra como la

mejor alternativa para la obtención de estos materiales, destacando la importancia de su mínimo impacto ambiental, la baja toxicidad y reducción en costos [4]. El proceso de síntesis verde no solo contribuye a reducir los impactos ambientales asociados con la producción de nanopartículas de plata, sino que también permite la exploración de una amplia gama de recursos biológicos para su síntesis. Diversos estudios han utilizado extractos de plantas [5], [6], [7], [8], [9], mostrando la versatilidad y abundancia de estos recursos para sintetizar nanopartículas con propiedades únicas.

Las NP poseen una alta relación superficie-volumen, por lo que son extremadamente reactivas y exhiben propiedades catalíticas [10]. Tienen la capacidad de atravesar membranas celulares y unirse a moléculas con diferentes funciones en los organismos y las células [11].

Estudios recientes muestran distintas aplicaciones de nanopartículas en la agricultura, destacando su potencial para mejorar la eficiencia en la germinación y el crecimiento de diversas especies de plantas. Este enfoque innovador combina la nanotecnología verde con prácticas agrícolas sostenibles, estableciendo un puente entre la nanotecnología y la mejora de los procesos en la agricultura [12], [13], [14], [15].

Diversos trabajos muestran el efecto de las nanopartículas de plata sobre la germinación y crecimiento de cultivos importantes. Los efectos de la concentración óptima de nanopartículas de plata muestran un efecto sobre la capacidad de germinación de semillas de arveja (*Pisum sativum*), así como el aumento del número de hojas, la longitud de las raíces, la longitud de los brotes, el peso fresco y seco de las plántulas [16]. Así también como resultado de la aplicación de nanopartículas de plata, con morfología esférica y tamaños entre 20 y 50 nm, sintetizadas por ruta verde, se muestra un efecto positivo sobre germinación, longitud de los brotes, longitud de las raíces, longitud de las plántulas, índice de vigor y peso seco de las semillas de maíz (*Zea mays*).

Los resultados del estudio de aplicación NP de Ag sobre semillas de trigo (*Triticum aestivum L.*), muestran una relación

con las concentraciones, indicando la existencia de valores óptimos promueven la germinación de las semillas y el crecimiento temprano de las plántulas de trigo en comparación con una muestra control. Adicionalmente se propone que el mecanismo por el cual las nanopartículas mejoran el proceso de germinación incluye la creación de nanoporos en la cubierta de la semilla [17].

Dada la necesidad de un mayor conocimiento sobre la eficiencia de las nanopartículas en una mayor tasa de germinación, en la presente investigación se analiza el efecto de nanopartículas de plata producidas por un método de síntesis verde sobre las características germinativas de *Chenopodium quinoa*.

II. METODOLOGÍA

1. Síntesis de nanopartículas de plata (NP Ag)

Para la síntesis de nanopartículas de plata se utilizó el método biogénico (síntesis verde) teniendo como agente precursor al nitrato de plata de la marca Merck (AgNO_3 , CAS: 7761-88-8) en solución con agua ultrapura 1mM. Se preparó 10 mL de esta solución para el proceso de síntesis. Como agente reductor se utilizó 6.5 mL de extracto de cascara de *Citrus reticulata*, de la variedad W. Murcott, el cual fue preparado mediante un proceso de maceración en alcohol al 96% durante 24 horas y posteriormente sometido a dos ciclos de ultrasonido de 40KHz y 50W durante dos ciclos de 15 minutos cada uno con un reposo intermedio de 30 minutos, finalmente este fue filtrado y conservado a 15°C.

La solución precursora se llevó a un agitador termomagnético a 60 °C y 400 rpm durante 10 min. añadiendo luego por goteo el extracto alcohólico de piel de *Citrus reticulata* y llevando esta solución hasta un pH 10 al agregar hidróxido de sodio de Merck (NaOH 98%, CAS: 1310-73-2) en solución acuosa conservando la agitación magnética y la temperatura por 10 minutos. Esta solución (Figura 1) se pone a enfriar en reposo y en un frasco ámbar sin exposición a la luz.

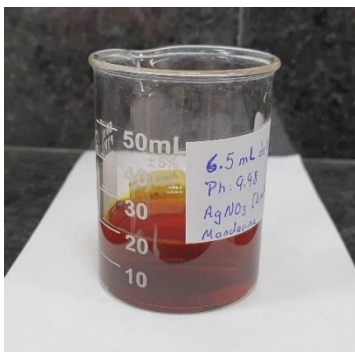


Figura 1. Nanopartículas de Ag en estado coloidal, sintetizadas con extracto de mandarina en proporción 0.39 Reductor/Precursor.

2. Inoculación de NP Ag en semillas de quinoa

Las nanopartículas de plata (Ag NP) fueron inicialmente obtenidas en forma de coloide, constituyendo la muestra stock. A partir de esta solución madre, se llevaron a cabo tres diluciones utilizando agua ultrapura, resultando en concentraciones de 7.14% (C1), 4.28% (C2) y 1.42% (C3) (%V/V). Cada una de estas diluciones fue homogeneizada durante una hora mediante ultrasonido a temperatura ambiente.

En términos de aplicabilidad, se conformaron tres grupos destinados al tratamiento con las nanopartículas, cada uno compuesto por 50 semillas de quinoa. Las concentraciones del coloide de Ag NP se expresaron en relación a su porcentaje en volumen (% v/v). Las semillas fueron dispuestas en placas Petri previamente esterilizadas y equipadas con dos discos de papel filtro cuantitativo Whatman N° 42. El procedimiento de tratamiento consistió en la aplicación de 2 mL de coloide de Ag NP mediante un atomizador. Simultáneamente, se incorporó una placa Petri adicional como control, donde las semillas estuvieron en contacto con 2 mL de agua.

La evaluación de la respuesta de las semillas ante los diferentes tratamientos se llevó a cabo en intervalos de 12 horas, durante un periodo total de 48 horas. Durante este tiempo, se registraron tanto el número de semillas germinadas como el tamaño de las radículas, permitiendo una evaluación detallada de la influencia de las nanopartículas en el desarrollo inicial de las plántulas de quinoa.

3. Análisis estadístico

Para llevar a cabo el análisis estadístico, se empleó el software Microsoft Excel junto con la extensión RealStats, utilizando un enfoque ANOVA unifactorial con un nivel de confianza del 95% ($p < 0,05$) para evaluar los datos relativos al porcentaje de germinación. La presentación de los resultados obtenidos en el proceso germinativo se estructuró con el promedio estadístico, seguido de su desviación estándar correspondiente. Este método de análisis estadístico proporciona una evaluación rigurosa y precisa de las variaciones en la germinación, ofreciendo una comprensión más profunda de la significancia de los datos recolectados en el estudio.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Caracterización de nanopartículas de plata (NP Ag)

Las nanopartículas de Ag sintetizadas por ruta verde inicialmente fueron evaluadas en base a la influencia del volumen de extracto de cáscara de *Citrus reticulata*. La Figura 2 muestra los espectros de absorbancia, en donde se puede evidenciar una diferencia significativa del pico de resonancia de plasmón superficial (RPS), en donde el volumen de 2.5 mL

representa la presencia de partículas de mayor diámetro, mientras que volúmenes mayores tienen a desplazar el pico RPS de longitudes de onda menor (418 nm), lo cual se traduce en la disminución del diámetro de las NPs [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24]. En tal sentido, las NP Ag obtenidas usando 6.5 mL de extracto fue la seleccionada por mostrar una mayor producción de nanomaterial y de menor diámetro [21], [23], [24].

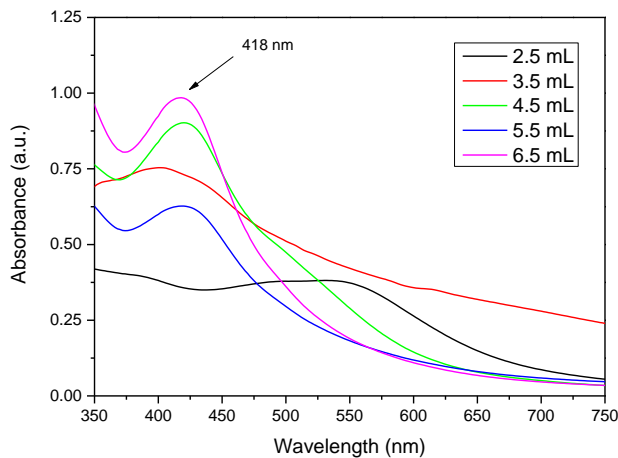


Figura 2. Espectrofotometría UV vis de la influencia del volumen de extracto *C. reticulata*, en la síntesis verde de NP Ag.

Los factores que influyen en las actividades biotecnológicas como la actividad y la biocompatibilidad de las nanopartículas dependen de su tamaño [25], por lo que usando la técnica de Dispersión dinámica de luz (DLS) se evaluó el tamaño y la distribución de las nanopartículas de plata. El diámetro promedio de las nanopartículas sintetizadas fue de 11.0 nm por volumen y el índice de polidispersidad fue de 0.271, como se ilustra en la Figura 3. Los resultados son consistentes con otros estudios que se han publicado [26], [27] mostraron nanopartículas fabricadas con extracto libre de células de *Bacillus thuringiensis* de diámetro promedio de 37.9 nm por volumen y un índice de polidispersidad de 0.575. Elamawi et al. [25] encontraron nanopartículas de 53.7 nm de diámetro promedio y un índice de polidispersidad de 0.209. Alzahrani [28] fabricó nanopartículas de plata usando cáscara de mandarina, obteniendo diámetro de partícula entre 16.68 y 30.29 nm, mientras que Azar et al. [29] usando también extracto de cáscara de mandarina obtuvo nanopartículas de plata con diámetro entre 5 y 20 nm.

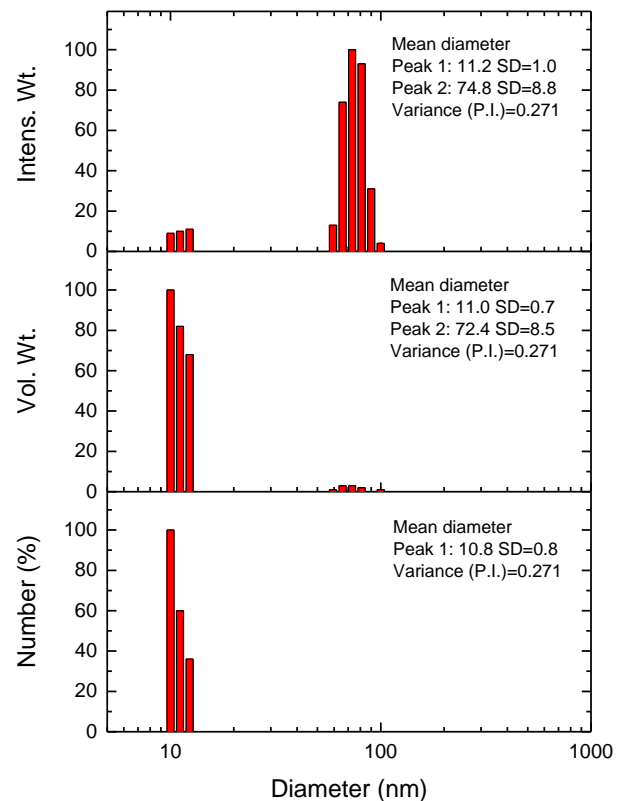


Figura 3. Histograma de frecuencias de tamaño obtenidas por DLS de NP Ag usando 6.5 mL de extracto de *C. reticulata*.

2. Porcentaje de germinación

La investigación se centró en analizar la germinación de semillas en relación con la variación de la concentración del coloide nanoparticulado de plata (Ag NP). La Figura 4 presenta de manera gráfica los resultados obtenidos a las 12 horas (representados por las barras anaranjadas) y a las 60 horas (barras verdes) desde el inicio del tratamiento. El periodo de evaluación se extendió hasta que las semillas dejaron de demostrar desarrollo radicular. Contrario a la muestra control, que inicialmente mostró un 66% de germinación, aumentando al 88% a las 48 horas, las semillas tratadas con la concentración C3 destacaron como las más eficaces, partiendo de un 66% de germinación y alcanzando un notable 90% al final del experimento. Los análisis estadísticos revelaron, en términos generales, una diferencia significativa entre la muestra control y las semillas tratadas con la concentración máxima del coloide Ag NP. Este hallazgo sugiere un impacto positivo del coloide en el proceso de germinación de las semillas, destacando la concentración C3 como la más beneficiosa en términos de desarrollo radicular. La observación de que la cubierta puede tener una permeabilidad selectiva añade complejidad al entendimiento de cómo las nanopartículas de plata afectan la

germinación. La falta de diferencia significativa en la germinación basada en la variación de la concentración del coloide Ag NP puede atribuirse a la influencia diferencial de la cubierta de la semilla, lo que sugiere una interacción compleja entre la composición de la cubierta y la respuesta de las semillas a las nanopartículas.

El estudio detallado de la germinación de semillas de quinoa en respuesta a la aplicación del coloide nanoparticulado de plata (NP Ag) revela la complejidad de los mecanismos involucrados en este proceso. La concentración C3 se destaca como la más efectiva en promover la germinación, pero es fundamental comprender cómo estas nanopartículas interactúan a nivel molecular. Las nanopartículas de plata poseen propiedades antimicrobianas y antiinflamatorias bien documentadas [30], [31]. En este contexto, su aplicación en semillas de quinoa puede generar respuestas beneficiosas a nivel celular. Se ha sugerido que las NP Ag pueden actuar como promotores del crecimiento [32], [33] al interactuar con las células vegetales y estimular la actividad de ciertos genes relacionados con la germinación. El ingreso de las NP Ag a las semillas de quinoa puede ocurrir a través de diferentes rutas. Se ha propuesto que las nanopartículas pudiesen ser absorbidas por las estructuras de la cubierta de la semilla, como las tricomas, y posteriormente ser internalizadas por las células radiculares en desarrollo. Este proceso puede estar mediado por interacciones electrostáticas y fenómenos de endocitosis, donde las nanopartículas son encapsuladas por membranas celulares.

Además, se ha observado que las NP Ag pueden afectar la permeabilidad de las membranas celulares, lo que podría influir en la absorción de agua y nutrientes esenciales durante la germinación. Este impacto en la permeabilidad de las células podría explicar, al menos en parte, la diferencia no significativa en la germinación basada en la variación de la concentración del coloide NP Ag. El análisis molecular detallado de las interacciones entre las NP Ag y las semillas de quinoa proporcionaría una comprensión más profunda de los mecanismos subyacentes a los efectos observados.

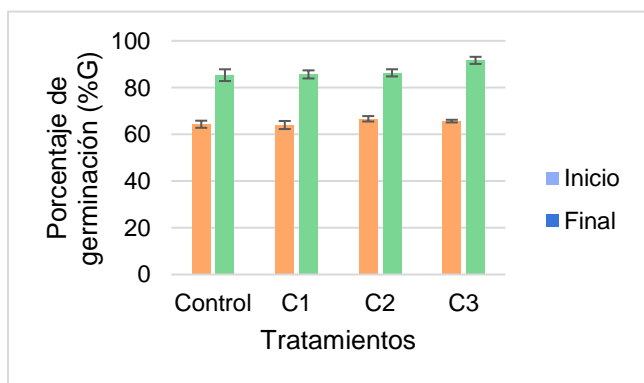


Figura 4. Porcentaje de germinación de semillas de quinoa en presencia de NP Ag.

3. Germinación diaria media (GDM)

El análisis del parámetro de germinación diaria media constituye un aspecto fundamental en la evaluación de la viabilidad y eficiencia de los tratamientos aplicados a las semillas. Este parámetro ofrece una visión detallada de cómo se desarrolla el proceso de germinación a lo largo del tiempo, proporcionando información valiosa sobre la velocidad y uniformidad del crecimiento de las plántulas.

La germinación diaria media se calcula dividiendo el porcentaje total de germinación entre el número de días transcurridos desde el inicio del tratamiento hasta el final del periodo de observación. Este cálculo permite determinar la tasa promedio a la que las semillas germinan por día, ofreciendo una medida dinámica de la eficacia de los tratamientos aplicados (Figura 5).

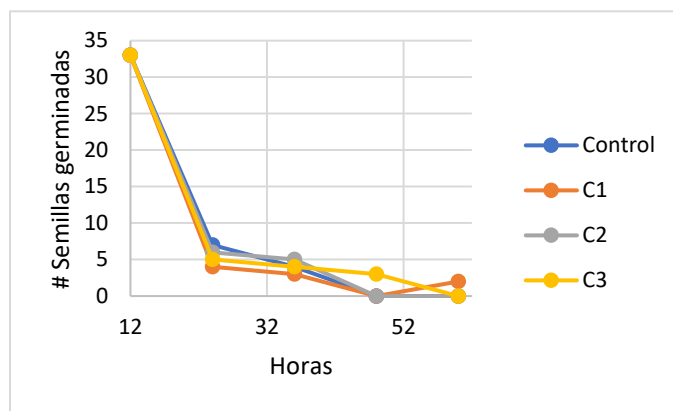


Figura 5. Tasa de germinación

Un aumento constante en la germinación diaria media indica una respuesta positiva y rápida de las semillas al tratamiento. Esta tendencia puede asociarse con la activación temprana de procesos metabólicos y enzimáticos que impulsan el crecimiento radicular y la emergencia de plántulas. Por otro lado, fluctuaciones en la germinación diaria media podrían sugerir variaciones en la respuesta de las semillas a lo largo del tiempo, indicando posibles periodos de adaptación o ajuste a las condiciones del tratamiento. La interpretación de la germinación diaria media se enriquece al considerar factores externos como la temperatura, la humedad y la calidad del sustrato, que pueden influir significativamente en la velocidad y uniformidad del proceso de germinación. Además, este parámetro proporciona información crucial para la planificación agronómica, ya que permite anticipar el momento óptimo para la siembra y establecer estrategias de manejo más precisas. En investigaciones agrícolas y estudios de mejora de cultivos, la germinación diaria media (Figura 6) se convierte en una herramienta esencial para evaluar la eficacia de nuevos tratamientos o tecnologías. Un análisis detallado de este parámetro no solo proporciona información cuantitativa sobre la germinación, sino que también revela patrones y dinámicas

que contribuyen a una comprensión más completa de los factores que influyen en el éxito inicial de las semillas.

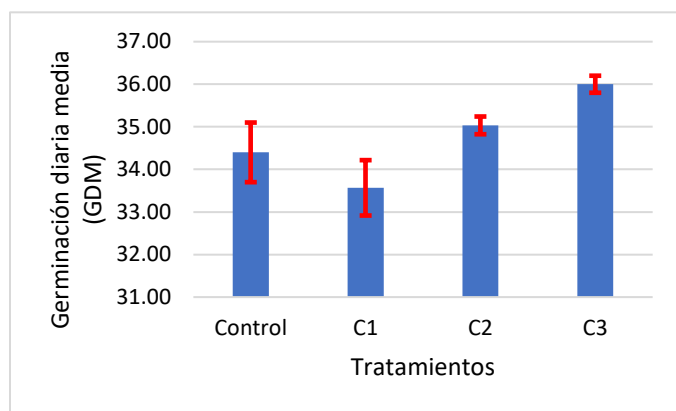


Figura 6. Germinación media diaria.

4. Índice de germinación

El índice de germinación es un parámetro crucial en la evaluación del éxito y la salud de las semillas durante el proceso germinativo. Este índice ofrece una medida cuantitativa que va más allá del simple porcentaje de germinación, al tener en cuenta tanto la velocidad como la uniformidad con la que las semillas emergen y desarrollan plántulas.

La fórmula del índice de germinación combina la tasa de germinación con el tiempo transcurrido, proporcionando una métrica que destaca la eficiencia del proceso. Un índice alto sugiere una germinación rápida y uniforme, indicando que las semillas responden de manera positiva a las condiciones ambientales y los tratamientos aplicados. El análisis del índice de germinación permite una evaluación más dinámica de la calidad de las semillas y la eficacia de los protocolos de tratamiento. Una alta tasa de germinación combinada con un índice elevado indica que las semillas no solo germinan en gran cantidad, sino que también lo hacen de manera sincronizada, lo que es esencial para un establecimiento uniforme de la población de plantas.

Por otro lado, un índice de germinación bajo podría sugerir problemas en la viabilidad de las semillas, como daño mecánico, patógenos o condiciones ambientales desfavorables. Además, variaciones en el índice de germinación entre diferentes tratamientos proporcionan información valiosa sobre la eficacia relativa de cada uno, contribuyendo a la toma de decisiones en la planificación agrícola.

El monitoreo del índice de germinación (Figura 7) a lo largo del tiempo revela patrones dinámicos en la respuesta de las semillas, ofreciendo una perspectiva temporal clave para entender mejor el proceso germinativo. Este análisis no solo es esencial en la investigación agronómica y la mejora de cultivos,

sino que también guía las prácticas de siembra y manejo en la agricultura, optimizando el rendimiento de las cosechas y contribuyendo a la sostenibilidad agrícola a largo plazo.

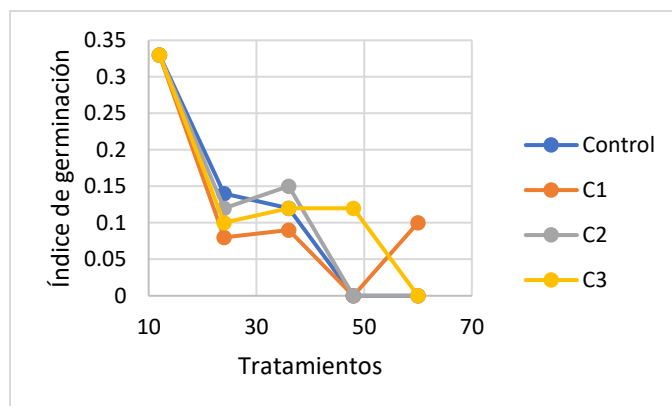


Figura 7. Índice de germinación.

La introducción de nanopartículas de plata como agente en el proceso germinativo de semillas representa un avance prometedor en la agricultura. Sin embargo, es importante abordar la seguridad ambiental y la viabilidad a largo plazo de esta práctica. Se requieren investigaciones exhaustivas para evaluar el impacto ambiental, la bioacumulación y los efectos en los ecosistemas. Además, es fundamental considerar la posibilidad de desarrollo de resistencia en las plantas y microorganismos del suelo. Un enfoque proactivo en la gestión de riesgos y la regulación adecuada puede garantizar que la aplicación de nanopartículas de plata en sistemas agrícolas sea segura y sostenible a largo plazo.

IV. CONCLUSIONES

El estudio se enfocó en analizar cómo la concentración del coloide nanoparticulado de plata (NP Ag) afecta la germinación de semillas de quinoa. Los resultados a las 12 y 60 horas demostraron un aumento significativo en la germinación con el tratamiento, siendo la concentración C3 la más efectiva con un 90% al final del experimento, en comparación con el 66% de la muestra control. Los análisis estadísticos confirmaron diferencias significativas, indicando un impacto positivo del coloide en la germinación. La complejidad de la interacción entre las nanopartículas y las semillas se atribuye a la permeabilidad selectiva de la cubierta de la semilla. Por otro lado, se logró sintetizar NP Ag mediante ruta verde, usando el extracto de *C. reticulata*, evidenciándose una influencia en base al volumen de extracto considerado como reductor en el proceso de síntesis. Los resultados del método practicado evidencian que usando un volumen de 6.5 mL se logra nanopartículas de menor tamaño y mejor producción coloidal.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección de Investigación, Innovación & Responsabilidad Social (DIIRS) de la Universidad Privada del Norte, por el apoyo en la gestión y financiamiento para la participación en este evento internacional. Por último, y no menos importante, agradecemos a los revisores por sus correcciones y sugerencias.

REFERENCIAS

- [1] G. Ren *et al.*, “Nutrient composition, functional activity and industrial applications of quinoa (Chenopodium quinoa Willd.),” *Food Chem.*, vol. 410, p. 135290, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.FOODCHEM.2022.135290.
- [2] S. H. Lee and B. H. Jun, “Silver Nanoparticles: Synthesis and Application for Nanomedicine,” *Int. J. Mol. Sci.* 2019, Vol. 20, Page 865, vol. 20, no. 4, p. 865, Feb. 2019, doi: 10.3390/IJMS20040865.
- [3] D. M. Mahapatra, K. C. Satapathy, and B. Panda, “Biofertilizers and nanofertilizers for sustainable agriculture: Phycoprosects and challenges,” *Sci. Total Environ.*, vol. 803, p. 149990, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.149990.
- [4] D. D. Suppiah, N. M. Julkapli, S. Sagadevan, and M. R. Johan, “Eco-friendly green synthesis approach and evaluation of environmental and biological applications of iron oxide nanoparticles,” *Inorg. Chem. Commun.*, vol. 152, p. 110700, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.INOCHE.2023.110700.
- [5] A. S. Dousari, S. S. Hosseininasab, M. R. Akbarizadeh, M. Naderifar, and N. Satarzadeh, “Mentha pulegium as a source of green synthesis of nanoparticles with antibacterial, antifungal, anticancer, and antioxidant applications,” *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, vol. 320, p. 112215, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.SCIENTA.2023.112215.
- [6] D. Asmat-Campos *et al.*, “Biogenic production of silver, zinc oxide, and cuprous oxide nanoparticles, and their impregnation into textiles with antiviral activity against SARS-CoV-2,” *Sci. Reports* 2023 131, vol. 13, no. 1, pp. 1–12, Jun. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-36910-x.
- [7] D. Asmat-Campos *et al.*, “Cu₂O nanoparticles synthesized by green and chemical routes, and evaluation of their antibacterial and antifungal effect on functionalized textiles,” *Biotechnol. Reports*, vol. 37, p. e00785, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.BTRE.2023.E00785.
- [8] D. Asmat-Campos, M. Lindsay Rojas, and A. Carreño-Ortega, “Toward sustainable nanomaterials: An innovative ecological approach for biogenic synthesis of TiO₂ nanoparticles with potential photocatalytic activity,” *Clean. Eng. Technol.*, vol. 17, p. 100702, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.CLET.2023.100702.
- [9] Q. Li, F. Liu, M. Li, C. Chen, and G. M. Gadd, “Nanoparticle and nanomineral production by fungi,” *Fungal Biol. Rev.*, vol. 41, pp. 31–44, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.FBR.2021.07.003.
- [10] S. Raut, A. Bhatavadekar, R. Chougule, and U. Lekhak, “Silver nanoparticles synthesis from Crinum moorei: Optimization, characterization, kinetics and catalytic application,” *South African J. Bot.*, vol. 165, pp. 494–504, Feb. 2024, doi: 10.1016/J.SAJB.2024.01.005.
- [11] H. Wu and Z. Li, “Nano-enabled agriculture: How do nanoparticles cross barriers in plants?,” *Plant Commun.*, vol. 3, no. 6, p. 100346, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.XPLC.2022.100346.
- [12] S. Pilco-Quesada, Y. Tian, B. Yang, R. Repo-Carrasco-Valencia, and J. P. Suomela, “Effects of germination and kilning on the phenolic compounds and nutritional properties of quinoa (Chenopodium quinoa) and kiwicha (Amaranthus caudatus),” *J. Cereal Sci.*, vol. 94, p. 102996, Jul. 2020, doi: 10.1016/J.JCS.2020.102996.
- [13] S. Babu *et al.*, “Nanofertilizers for agricultural and environmental sustainability,” *Chemosphere*, vol. 292, p. 133451, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.133451.
- [14] P. DAM, M. L. PARET, R. MONDAL, and A. K. MANDAL, “Advancement of noble metallic nanoparticles in agriculture: A promising future,” *Pedosphere*, vol. 33, no. 1, pp. 116–128, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.PEDSPH.2022.06.026.
- [15] U. Aqeel, T. Aftab, M. M. A. Khan, M. Naeem, and M. N. Khan, “A comprehensive review of impacts of diverse nanoparticles on growth, development and physiological adjustments in plants under changing environment,” *Chemosphere*, vol. 291, p. 132672, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.132672.
- [16] M. S. Rahman, A. Chakraborty, A. Kibria, and M. J. Hossain, “Effects of silver nanoparticles on seed germination and growth performance of pea (Pisum sativum),” *Plant Nano Biol.*, vol. 5, p. 100042, Aug. 2023, doi: 10.1016/J.PLANA.2023.100042.
- [17] Y. Singh, S. Kaushal, and R. S. Sodhi, “Biogenic synthesis of silver nanoparticles using cyanobacterium *Leptolyngbya* sp. WUC 59 cell-free extract and their effects on bacterial growth and seed germination,” *Nanoscale Adv.*, vol. 2, no. 9, pp. 3972–3982, Sep. 2020, doi: 10.1039/D0NA00357C.
- [18] J. F. Liu *et al.*, “Cloud point extraction as an advantageous preconcentration approach for analysis of trace silver nanoparticles in environmental waters,” *Anal. Chem.*, vol. 81, no. 15, pp. 6496–6502, Aug. 2009, doi: 10.1021/AC900918E/SUPPL_FILE/AC900918E_SI_001.PDF.
- [19] J. B. Chao *et al.*, “Speciation analysis of silver

- nanoparticles and silver ions in antibacterial products and environmental waters via cloud point extraction-based separation,” *Anal. Chem.*, vol. 83, no. 17, pp. 6875–6882, Sep. 2011, doi: 10.1021/AC201086A/ASSET/IMAGES/MEDIUM/A-C-2011-01086A_0001.GIF.
- [20] V. P. Veeraraghavan, N. D. Periadurai, T. Karunakaran, S. Hussain, K. M. Surapaneni, and X. Jiao, “Green synthesis of silver nanoparticles from aqueous extract of *Scutellaria barbata* and coating on the cotton fabric for antimicrobial applications and wound healing activity in fibroblast cells (L929),” *Saudi J. Biol. Sci.*, vol. 28, no. 7, pp. 3633–3640, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.SJBS.2021.05.007.
- [21] H. Kolya, P. Maiti, A. Pandey, and T. Tripathy, “Green synthesis of silver nanoparticles with antimicrobial and azo dye (Congo red) degradation properties using *Amaranthus gangeticus* Linn leaf extract,” *J. Anal. Sci. Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–7, Dec. 2015, doi: 10.1186/S40543-015-0074-1/FIGURES/9.
- [22] Y. Y. Loo, B. W. Chieng, M. Nishibuchi, and S. Radu, “Synthesis of silver nanoparticles by using tea leaf extract from *Camellia Sinensis*,” *Int. J. Nanomedicine*, vol. 7, pp. 4263–4267, Aug. 2012, doi: 10.2147/IJN.S33344.
- [23] R. G. Saratale *et al.*, “Exploiting fruit byproducts for eco-friendly nanosynthesis: Citrus \times clementina peel extract mediated fabrication of silver nanoparticles with high efficacy against microbial pathogens and rat glial tumor C6 cells,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 25, no. 11, pp. 10250–10263, Apr. 2018, doi: 10.1007/S11356-017-8724-Z/METRICS.
- [24] N. Basavegowda and Y. Rok Lee, “Synthesis of silver nanoparticles using Satsuma mandarin (*Citrus unshiu*) peel extract: A novel approach towards waste utilization,” *Mater. Lett.*, vol. 109, pp. 31–33, Oct. 2013, doi: 10.1016/J.MATLET.2013.07.039.
- [25] A. H. Hashem *et al.*, “Antifungal Activity of Biosynthesized Silver Nanoparticles (AgNPs) against *Aspergilli* Causing *Aspergillosis*: Ultrastructure Study,” *J. Funct. Biomater.*, vol. 13, no. 4, p. 242, Dec. 2022, doi: 10.3390/JFB13040242/S1.
- [26] E. Matyjas-Zgondek, E. Rybicki, A. Bacciarelli-Ulacha, and M. I. Szykowska-Jóźwik, “Antibacterial Properties of Silver-Finished Textiles,” *Fibres Text. East. Eur.*, Accessed: Feb. 02, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/41651192_Antibacterial_Properties_of_Silver-Finished_Textiles
- [27] E. Smiechowicz, B. Niekraszewicz, P. Kulpinski, and K. Dzitko, “Antibacterial composite cellulose fibers modified with silver nanoparticles and nanosilica,” *Cellulose*, vol. 25, no. 6, pp. 3499–3517, Jun. 2018, doi: 10.1007/S10570-018-1796-1/TABLES/9.
- [28] R. M. Elamawi, R. E. Al-Harbi, and A. A. Hendi, “Biosynthesis and characterization of silver nanoparticles using *Trichoderma longibrachiatum* and their effect on phytopathogenic fungi,” *Egypt. J. Biol. Pest Control*, vol. 28, no. 1, pp. 1–11, Dec. 2018, doi: 10.1186/S41938-018-0028-1/FIGURES/10.
- [29] E. Alzahrani and E. Alzahrani, “Eco-Friendly Production of Silver Nanoparticles from Peel of Tangerine for Degradation of Dye,” *World J. Nano Sci. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 10–16, Feb. 2015, doi: 10.4236/WJNSE.2015.51002.
- [30] H. Tabasum, B. A. Bhat, B. A. Sheikh, V. N. Mehta, and J. V. Rohit, “Emerging perspectives of plant-derived nanoparticles as effective antimicrobial agents,” *Inorg. Chem. Commun.*, vol. 145, p. 110015, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.INOCHE.2022.110015.
- [31] S. Ahmed, M. Ahmad, B. L. Swami, and S. Ikram, “A review on plants extract mediated synthesis of silver nanoparticles for antimicrobial applications: A green expertise,” *J. Adv. Res.*, vol. 7, no. 1, pp. 17–28, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.JARE.2015.02.007.
- [32] S. Mukherjee, S. Roy, and M. B. Arnao, “Nanovehicles for melatonin: a new journey for agriculture,” *Trends Plant Sci.*, vol. 0, no. 0, 2023, doi: 10.1016/J.TPLANTS.2023.11.016.
- [33] A. Juárez-Maldonado, S. González-Morales, M. Cabrera-De la Fuente, J. Medrano-Macías, and A. Benavides-Mendoza, “Nanometals as Promoters of Nutritional Quality in Crop Plants,” *Impact Nanosci. Food Ind.*, pp. 277–310, Jan. 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-811441-4.00010-8.