

Evaluación de CaCO₃NPs obtenidas de maguey y efecto en la germinación de *Raphanus sativus* L.

Evaluation of CaCO₃NPs obtained from maguey and effect on *Raphanus sativus* L. germination

Elizabeth Garza-Valverde¹ , Celestino García-Gómez¹ , Emilio Olivares-Sáenz¹ , Rafael Zúñiga-Valenzuela² , Rafael Ruiz-Hernández³ , José Gerardo Uresti-Porras^{1*} 

¹Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Francisco Villa Núm. S/M, CP. 66050, Ex hacienda el Canadá, General Escobedo, Nuevo León, México.

²Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz, Predio Tepetates, Manlio Fabio, CP. 91700, Altamirano, Veracruz, México.

³Facultad de Agricultura y Zootecnia, Universidad Juárez del estado de Durango, carretera Gómez Palacio-Tlahualilo km 32, CP. 35111, Venecia, Gómez Palacio, Durango, México.

*Autor de correspondencia: jurestip@uanl.edu.mx

Artículo científico

Recibido: 10 de marzo 2026

Aceptado: 04 de septiembre 2026

RESUMEN. La nanotecnología es una herramienta prometedora para afrontar los desafíos de la productividad agrícola, en especial en el desarrollo de nanofertilizantes para mejorar la eficiencia en la absorción de nutrientes. El presente estudio evaluó el efecto de las nanopartículas de carbonato de calcio (CaCO₃NPs) obtenidas de maguey sobre la germinación y vigor de semillas de *Raphanus sativus* L. Se aplicaron suspensiones con concentraciones de 100, 200 y 300 mg L⁻¹, además de un control con agua destilada. Los resultados indicaron que las nanopartículas promovieron un aumento significativo en el crecimiento longitudinal de las plántulas (longitud de radícula, hipocótilo y longitud total) a concentraciones de 200 y 300 mg L⁻¹. El diámetro del hipocótilo fue mayor a 200 mg L⁻¹, pero se redujo con la concentración más alta (300 mg L⁻¹). En términos de biomasa, los tratamientos con nanopartículas mostraron una disminución significativa en comparación con el control. El índice de calidad de Dickson (ICD), que evalúa la calidad general de las plántulas, fue significativamente menor en las concentraciones de 100 y 300 mg L⁻¹, mientras que a 200 mg L⁻¹ se mantuvo similar al control. La germinación y el vigor no fueron modificados significativamente, mientras que algunas variables de elongación aumentaron y la acumulación de materia seca disminuyó.

Palabras clave: Síntesis verde, bioresiduos, bioestimulación, economía circular.

ABSTRACT. Nanotechnology is a promising tool for addressing the challenges of agricultural productivity, especially in the development of nanofertilizers to improve nutrient uptake efficiency. This study evaluated the effect of calcium carbonate nanoparticles (CaCO₃NPs) obtained from agave on the germination and vigor of *Raphanus sativus* L. seeds. Suspensions were applied at concentrations of 100, 200, and 300 mg L⁻¹, in addition to a control with distilled water. The results indicated that the nanoparticles promoted a significant increase in the longitudinal growth of the seedlings (radicular length, hypocotyl length, and total length) at concentrations of 200 and 300 mg L⁻¹. The hypocotyl diameter was greater at 200 mg L⁻¹ but decreased at the highest concentration (300 mg L⁻¹). In terms of biomass, the nanoparticle treatments showed a significant decrease compared to the control. The Dickson Quality Index (DQI), which assesses the overall quality of the seedlings, was significantly lower at concentrations of 100 and 300 mg L⁻¹, while at 200 mg L⁻¹ it remained similar to the control. These results suggest that CaCO₃NPs positively affect morphological growth, but their impact on biomass and quality varies with the applied concentration.

Keywords: Green synthesis, bio-waste, biostimulation, circular economy.

Como citar: Garza-Valverde E, García-Gómez C, Olivares-Sáenz E, Zúñiga-Valenzuela R, Ruiz-Hernández R, Uresti-Porras JG (2026) Evaluación de CaCO₃NPs obtenidas de maguey y efecto en la germinación de *Raphanus sativus* L. Eco ns y Recursos Agropecuarios 13(3): e5208. DOI: 10.19136/era.a13n3.5208.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población mundial representa un desafío significativo para la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental (Ende *et al.* 2024). Se estima que para el 2050 se alcanzarán los 10 mil millones de personas, por lo que aumentará la demanda de alimentos (Ali *et al.* 2024). La productividad agrícola es un componente esencial para abastecer a una población creciente mediante prácticas e innovaciones sostenibles (Taheri *et al.* 2024).

La nanotecnología representa una alternativa para afrontar estos desafíos, debido a las propiedades fisicoquímicas de los nanomateriales permiten aplicaciones específicas en la agroindustria (Rutkowski *et al.* 2024), particularmente en el desarrollo de nanofertilizantes que mejoran la eficiencia en la absorción de nutrientes y aumentan el rendimiento agrícola, incluso bajo condiciones desfavorables (Mahawar *et al.* 2024). No obstante, su implementación en agroecosistemas plantea interrogantes sobre su impacto ambiental y fitotoxicidad. Por ello, resulta indispensable evaluar sus efectos fisiológicos y ecológicos para asegurar una aplicación responsable y sostenible en la producción agrícola (Santás-Miguel *et al.* 2023). Debido a las propiedades de las nanopartículas, es necesario comprender su absorción por las células vegetales y sus efectos en la fisiología de las plantas, lo que requiere técnicas de monitoreo para determinar el impacto en el desarrollo de las semillas (Tyagi *et al.* 2025). Los estudios en condiciones controladas durante la germinación son ampliamente utilizados para evaluar los efectos de las nanopartículas en plantas, ya que permiten identificar respuestas estimulantes o fitotóxicas y controlar las variables ambientales para obtener información precisa. Por lo tanto, estos estudios se consideran una etapa inicial necesaria para comprender sus efectos antes de las evaluaciones en condiciones de campo (Zamora-Ledezma *et al.* 2025).

El calcio es un mineral esencial en la producción agrícola, implicado en funciones como la división celular, la integridad estructural de la pared celular y la estabilidad de las membranas celulares (Kasem *et al.* 2023). Diversos estudios han mostrado que la aplicación de calcio mejora significativamente la nutrición vegetal y la tolerancia al estrés (Gao *et al.* 2023). Otras investigaciones han reportado que la aplicación de nanopartículas de óxido de calcio impacta de manera positiva en la germinación y el desarrollo de *Brassica napus* L. bajo condiciones de sequía (Mazhar *et al.* 2022, Koley *et al.* 2025). El cultivo de *Raphanus sativus* L. destaca por su valor nutricional al ser una fuente importante de vitaminas A y C (Bhardwaj *et al.* 2024). Al respecto, el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera reporta que en 2023 se establecieron 2 489 ha en México, con una producción de 55 890 toneladas (SIAP 2026). Por lo anterior, esta investigación tiene como objetivo evaluar el efecto de diferentes concentraciones de nanopartículas de carbonato de calcio (CaCO₃NPs) en la germinación y viabilidad del cultivo de *R. sativus*. La hipótesis planteada fue que la aplicación de estas nanopartículas podría estimular el crecimiento inicial del cultivo en función de la concentración aplicada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación de la investigación

El presente estudio se llevó a cabo en la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), en General Escobedo, Nuevo León, México. Este municipio se localiza a una latitud 26° 49' N, longitud -100° 19' O y altitud 500 msnm de acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI 2019). Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Remediación Ambiental y Análisis de Agua, Suelo y Planta de dicha facultad.

Nanopartículas

Las nanopartículas utilizadas en el experimento fueron sintetizadas y caracterizadas en el Centro de Innovación, Investigación y Desarrollo en Ingeniería y Tecnología (CIIDIT-UANL) a partir de bagazo de maguey (Esquivias-Fierro *et al.* 2021).

Material vegetal

Se utilizaron semillas de *R. sativus*, variedad Champion, caracterizada por producir raíces comestibles cilíndricos de color rojo brillante.

Tratamientos aplicados

Las suspensiones de CaCO₃NPs fueron preparadas en agua destilada y dispersadas durante 30 min en un sonicador (PS-08A, Eujgoov, China). Las suspensiones se diluyeron hasta alcanzar las concentraciones correspondientes a cada tratamiento (Figura 1). Los tratamientos evaluados consistieron en un tratamiento control con agua destilada (T1), y tres dosis de CaCO₃NPs: 100 (T2), 200 (T3) y 300 mg L⁻¹ (T4).

Germinación de semillas y crecimiento de plántulas

Para el experimento se utilizaron lotes de 60 semillas por tratamiento que se distribuyeron uniformemente en cajas Petri de vidrio (150 mm por 15 mm) utilizando pinzas de disección. Durante la etapa de imbibición se agregó a cada tratamiento 10 mL de la solución de CaCO₃NPs. Después, las semillas se mantuvieron durante 24 h en una cámara de crecimiento (TE-371/240L, TECNAL, Brasil) a 25 ± 2 °C. Transcurrido el periodo de imbibición, las semillas se colocaron en cuatro repeticiones de 15 semillas distribuidas sobre papel filtro de 2 µm previamente humedecido con los tratamientos correspondientes y cubiertas con otra capa de papel filtro. Finalmente, las cajas Petri fueron colocadas nuevamente en la cámara de crecimiento durante siete días bajo las mismas condiciones para todos los tratamientos.

Análisis de variables agronómicas

Los parámetros morfológicos y fisiológicos evaluados durante la germinación y desarrollo de las plántulas se resumen en la Tabla 1. Las mediciones fueron realizadas utilizando un vernier digital. Los pesos frescos y secos se determinaron en una balanza analítica (ROCA, FA2104, China). Para la obtención del peso seco, las muestras fueron secadas en estufa de aire forzado a 70 °C hasta peso constante y posteriormente enfriadas en desecador antes de su pesaje. Para evaluar las variables de crecimiento y biomasa se seleccionaron cinco plántulas por tratamiento (n = 5).

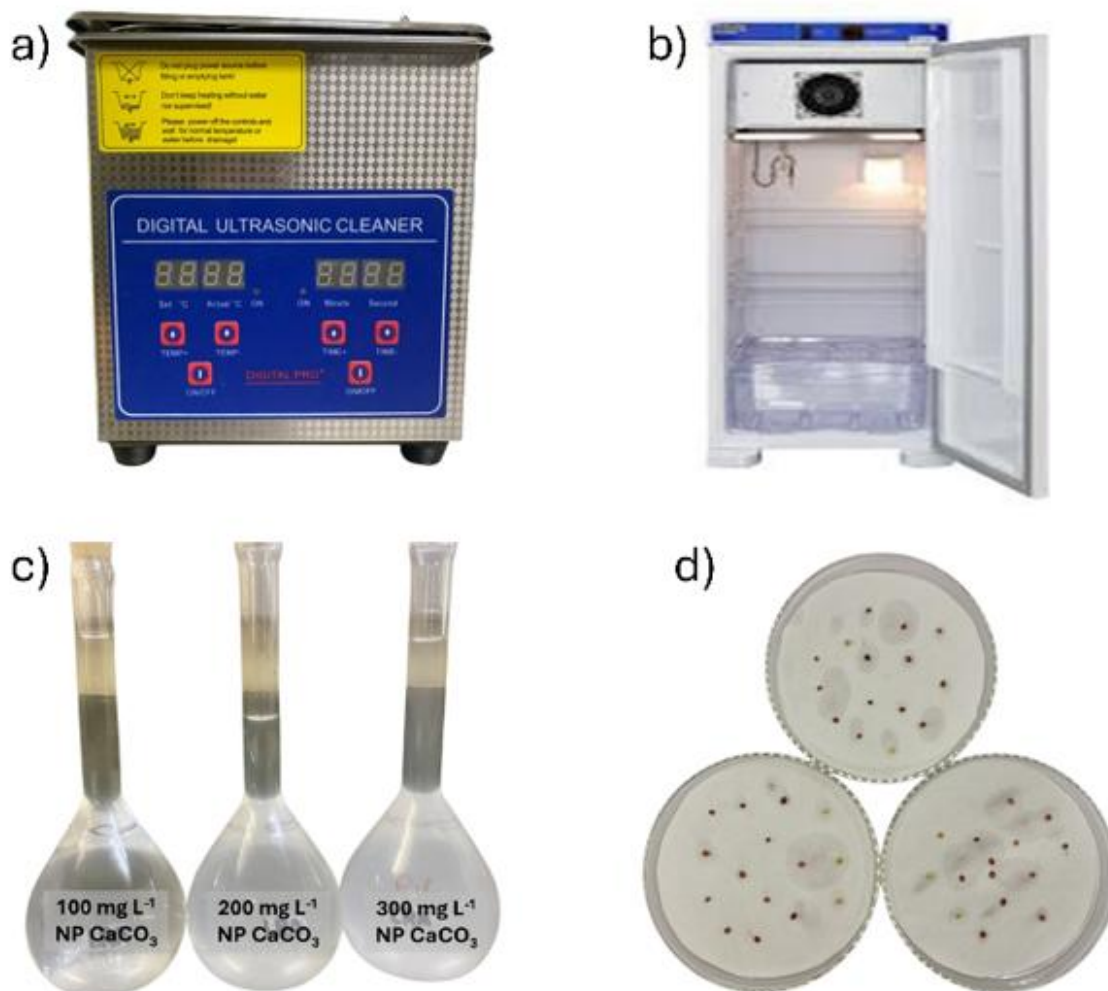


Figura 1. Preparación y acondicionamiento del ensayo de germinación de *R. sativus* con CaCO₃NPs. (a) Equipo de ultrasonido empleado para la dispersión homogénea de las nanopartículas en solución. (b) Incubadora utilizada para el control de las condiciones ambientales durante el periodo experimental. (c) Suspensiones de nanopartículas preparadas a diferentes concentraciones. (d) Cajas Petri con semillas al inicio del ensayo (día 0).

Diseño experimental y análisis estadístico

El experimento fue realizado con un diseño experimental completamente al azar, con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones. El modelo lineal general fue $Y_{ij} = \mu + \alpha_i + e_i$; donde Y_{ij} = variable respuesta; μ = media global; α_i = efecto del tratamiento; e_i = error experimental. La unidad experimental fue una caja Petri con 15 semillas. La normalidad de los datos fue evaluada mediante la prueba de Ryan-Joiner y la homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene. Las diferencias entre tratamientos se evaluaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, las medias de los tratamientos se compararon por la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) utilizando el paquete estadístico Minitab versión 17.0 (Pensilvania, PA, USA). Los resultados se reportaron como valores medios de cuatro muestras $\pm$ desviación estándar.

Tabla 1. Parámetros morfológicos y fisiológicos evaluados durante la germinación y desarrollo de plántulas.

Variable	Día de evaluación	Unidad	Fórmula	Cita
Vigor de semilla (V)	4	%	$V \% = \frac{\text{plántulas normales}}{\text{número de semillas incubadas}} \times 100$	(Abadía <i>et al.</i> 2024).
Porcentaje de germinación (G)	7	%	$G \% = \frac{\text{número de semillas germinadas}}{\text{número de semillas incubadas}} \times 100$	(Jan <i>et al.</i> 2023)
Plántulas anormales (PA)	7	%	$PA \% = \left(\frac{\text{Número de plántulas anormales}}{\text{Número total de semillas germinadas}} \right)$	(Tamindžić <i>et al.</i> 2023)
Longitud de plúmula (LP)	7	mm		(Kumar <i>et al.</i> 2023)
Longitud de radícula (LR)	7	mm		(Kumar <i>et al.</i> 2023)
Longitud de hipocótilo (LH)	7	mm		(Minaoui <i>et al.</i> 2024)
Longitud total de plántula (LT)	7	mm		(Kasem <i>et al.</i> 2023)
Peso fresco de raíz (PFR)	7	g		(Ahumada-Rudolph <i>et al.</i> 2025)
Peso fresco parte aérea (PFA)	7	g		(Ahumada-Rudolph <i>et al.</i> 2025)
Peso seco de raíz (PSR)	Posterior al secado	g		(Mazepa <i>et al.</i> 2021)
Peso seco parte aérea (PSA)	Posterior al secado	g		(Mazepa <i>et al.</i> 2021)
Porcentaje de peso seco de raíz (PPSR)	Posterior al secado	%	$PSR \% = \left(\frac{PSR}{PSR + PSA} \right) \times 100$	(Klekotka <i>et al.</i> 2022)
Porcentaje de peso seco aéreo (PSA)	Posterior al secado	%	$PSA \% = \left(\frac{PSA}{PFA} \right) \times 100$	(Klekotka <i>et al.</i> 2022)
Porcentaje de materia seca (MS)	Posterior al secado	%	$\% MS = \left(\frac{PS}{PF} \right) \times 100$	
Diámetro de tallo (D)	7	mm		(Kasem <i>et al.</i> 2023)
Índice de Calidad de Dickson (ICD)	7	-	$ICD = \frac{\text{Peso seco total (g)}}{\left(\frac{\text{altura (cm)}}{D \text{ (mm)}} + \frac{PSA \text{ (g)}}{PSR \text{ (g)}} \right)}$	(Dickson <i>et al.</i> 1960).
Relación parte aérea/raíz (RPA/R)	Posterior al secado	-	$\frac{RPA}{R} = \frac{\text{masa seca de parte aérea (g)}}{\text{masa seca de raíz (g)}}$	(Di Benedetto y Tognetti, 2016)

RESULTADOS

Las variables porcentaje de germinación, vigor, plántulas anormales, longitud de plúmula y relación parte aérea/raíz no presentaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ($p > 0.05$). Estos resultados sugieren que la aplicación de CaCO₃NPs en las concentraciones evaluadas no afectó significativamente los procesos iniciales de germinación ni el desarrollo temprano de la parte aérea en las plántulas de *R. sativus*. La Figura 2 muestra el desarrollo de plántulas bajo los diferentes tratamientos evaluados. En todos los tratamientos se observó la emergencia de la radícula y el desarrollo del eje aéreo, lo que confirma la viabilidad de las semillas utilizadas. Asimismo, se observaron diferencias visuales en la longitud de las plántulas (Figura 2 a-d). Algunas condiciones promovieron un mayor alargamiento, mientras que otras presentaron un crecimiento más moderado.

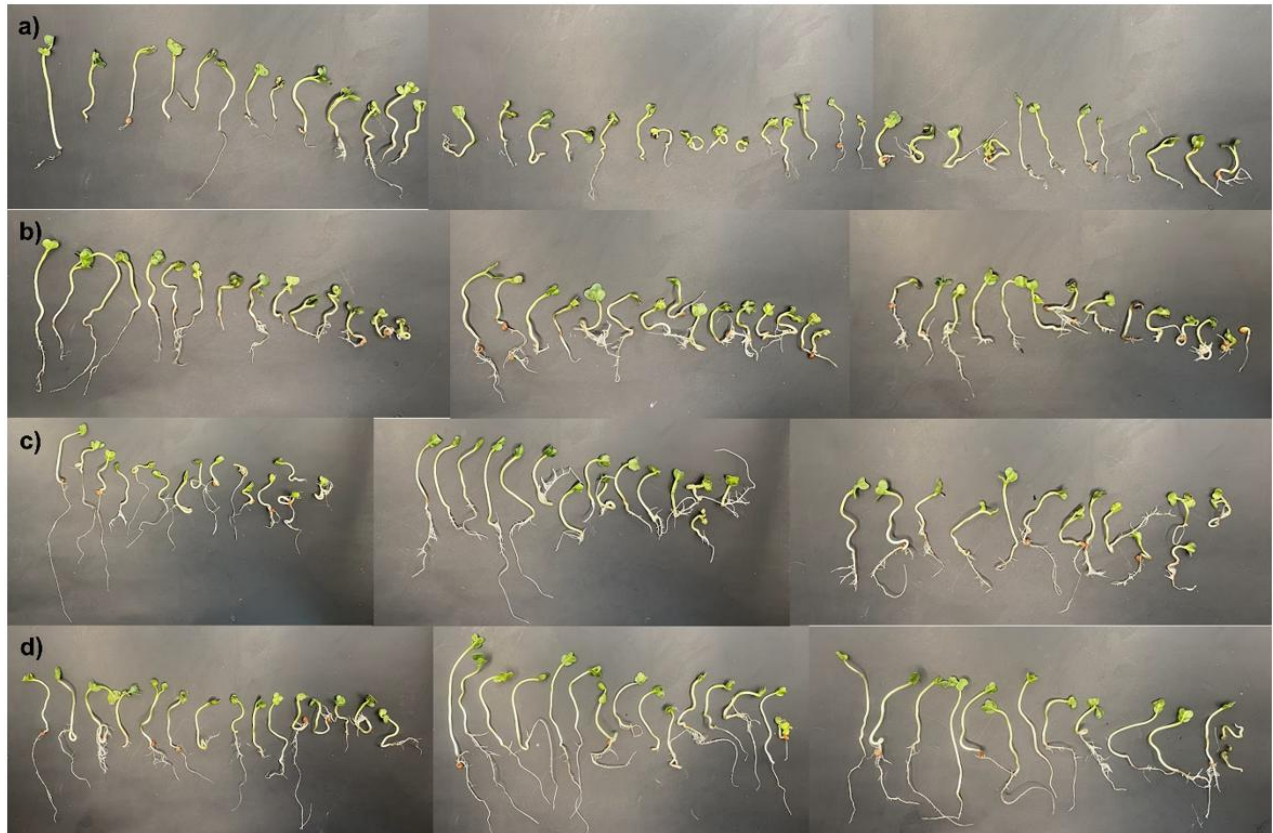


Figura 2. Desarrollo de plántulas de *R. sativus* a los siete días de germinación bajo distintas concentraciones de CaCO₃NPs: (a) Control (T1); (b) 100 mg L⁻¹ (T2); (c) 200 mg L⁻¹ (T3); y (d) 300 mg L⁻¹ (T4).

Los parámetros que presentaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ($p < 0.05$) fueron la longitud de radícula, la longitud de hipocótilo, la longitud total de la plántula, el diámetro de hipocótilo, así como los porcentajes de peso seco de raíz, peso seco parte aérea y materia seca, además del índice de calidad de Dickson (ICD).

Crecimiento longitudinal

La longitud de radícula, la longitud de hipocótilo y la longitud total de la plántula presentaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$). La Figura 3 muestra la comparación de medias del efecto de las concentraciones de CaCO₃NPs sobre el crecimiento longitudinal de plántulas de *R. sativus*. En comparación con el T1 (control), los tratamientos con CaCO₃NPs promovieron un mayor crecimiento de las plántulas, particularmente en la longitud de la radícula. Los valores más altos para esta variable se registraron en T3 (200 mg L⁻¹) y T4 (300 mg L⁻¹), los cuales fueron significativamente superiores al T1. La longitud del hipocótilo mostró una tendencia similar, con un aumento asociado a la concentración, donde se destaca el T4 por el mayor valor promedio. La longitud total de la plántula siguió el mismo patrón, con los valores más elevados en T3 y T4, que fueron estadísticamente superiores a T1 y T2.

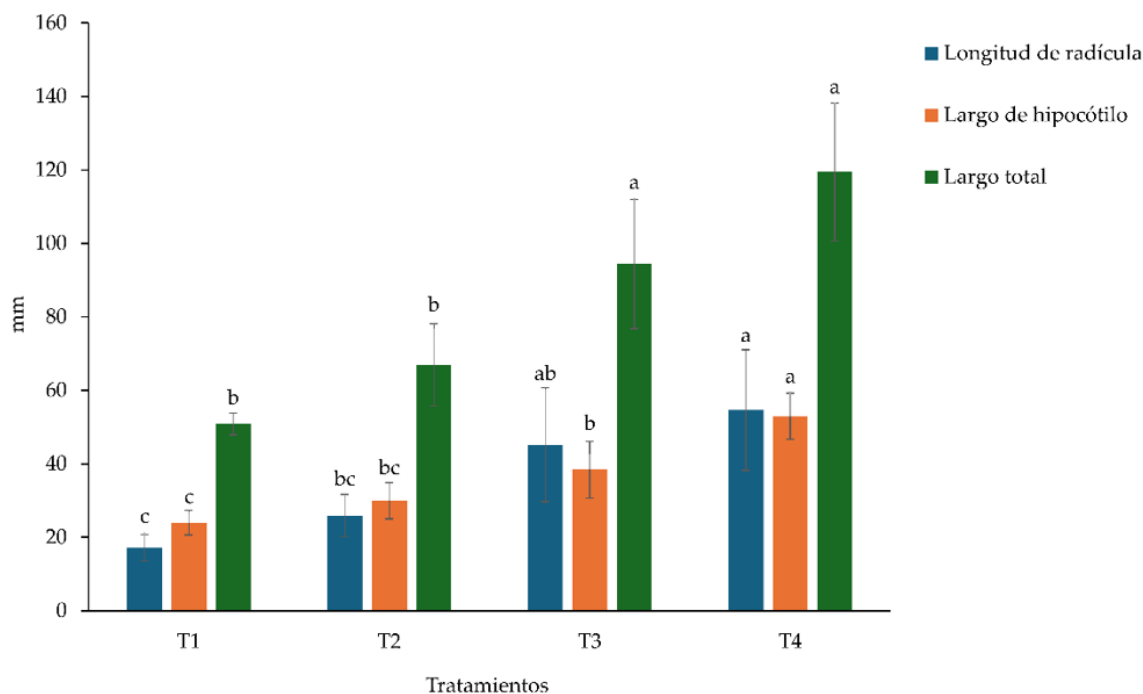


Figura 3. Efecto de CaCO₃NPs en la longitud de radícula, longitud de hipocótilo y la longitud total de la plántula (mm). Tratamientos: T1 = Control (agua destilada); T2 = 100 mg L⁻¹; T3 = 200 mg L⁻¹; T4 = 300 mg L⁻¹. Letras iguales dentro de la misma variable indican no diferencias significativas entre tratamientos (Tukey, $P < 0.05$).

Acumulación de biomasa / Materia seca

El porcentaje de peso seco de raíz, peso seco de la parte aérea y materia seca mostraron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$). La Figura 4 presenta la comparación de medias del efecto de la concentración de CaCO₃NPs en la acumulación de biomasa de *R. sativus*. En las tres variables, el T1 (control) presentó los porcentajes más altos. El peso seco de la parte aérea y la materia seca mostraron una tendencia similar al disminuir conforme aumentó la concentración de CaCO₃NPs. En contraste, el porcentaje de peso seco de raíz tuvo el valor más bajo en el T2 seguido del T3.

Diámetro de hipocótilo

El diámetro del hipocótilo de las plántulas de *R. sativus* presentó diferencias estadísticas entre tratamientos ($p < 0.05$). La Figura 5 muestra la comparación de medias del efecto de la concentración de CaCO₃NPs sobre esta variable. El mayor diámetro se registró en T3, seguido de T2 y T1, mientras que T4 presentó el menor valor.

Índice de calidad de Dickson

El ICD de las plántulas de *R. sativus* fue diferente estadísticamente entre los tratamientos. La Figura 6 muestra la comparación de medias del efecto de la concentración de CaCO₃NPs en la calidad general.

T1 y T3 presentaron los valores más altos, sin diferencias significativas entre ellos, mientras que el T2 y T4 fueron similares entre sí y tuvieron los valores más bajos.

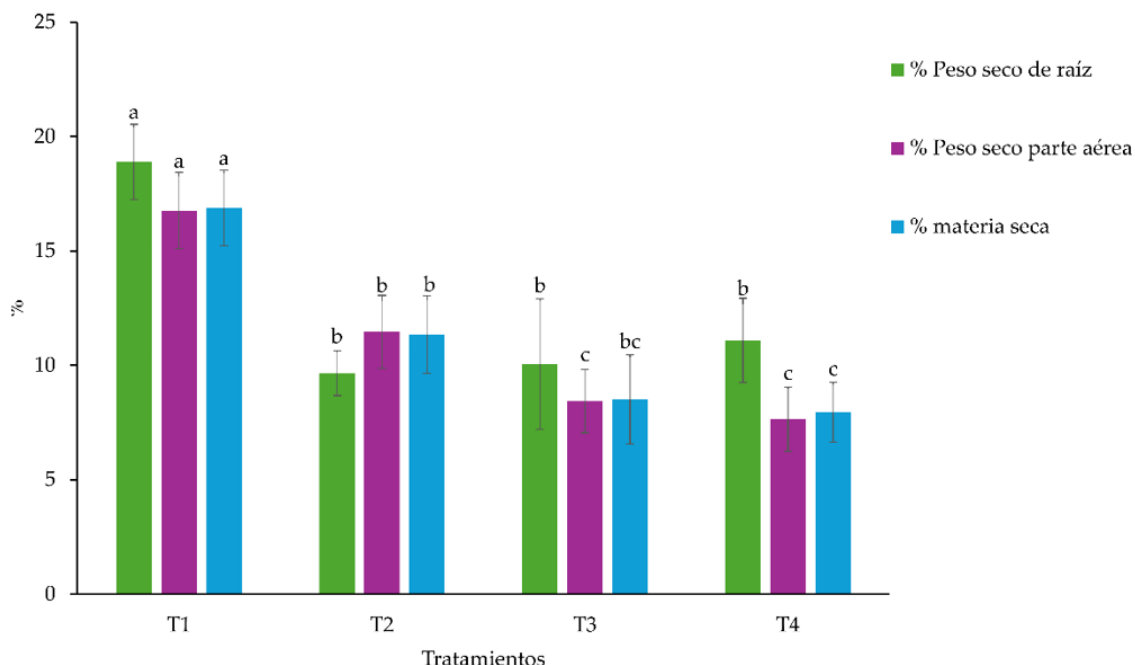


Figura 4. Efecto de CaCO₃NPs en el peso seco de raíz, el peso seco de parte aérea y la materia seca (%). Tratamientos: T1 = Control (agua destilada); T2 = 100 mg L⁻¹; T3 = 200 mg L⁻¹; T4 = 300 mg L⁻¹. Letras iguales dentro de la misma variable indican no diferencias significativas entre tratamientos (Tukey, P < 0.05).

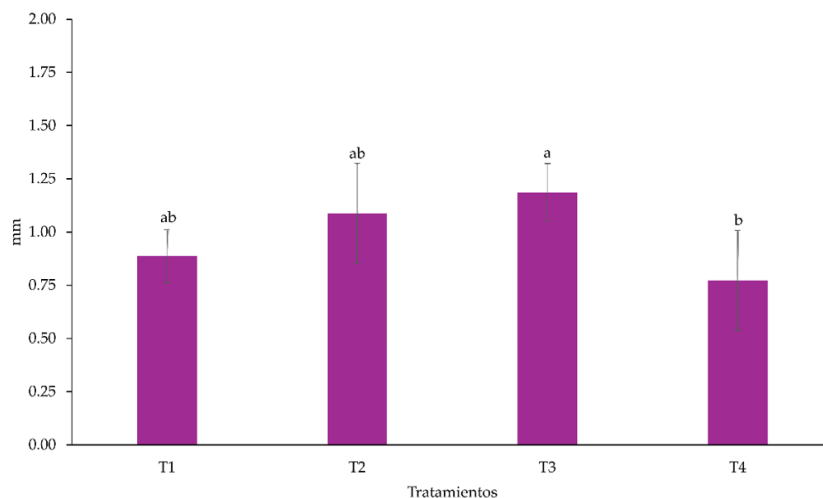


Figura 5. Efecto de CaCO₃NPs en el diámetro (mm). Tratamientos: T1 = Control (agua destilada); T2 = 100 mg L⁻¹; T3 = 200 mg L⁻¹; T4 = 300 mg L⁻¹. Letras iguales indican no diferencias significativas entre tratamientos (Tukey, P < 0.05).

DISCUSIÓN

Crecimiento longitudinal

Diversas investigaciones señalan que el calcio en forma de Ca²⁺ favorece el crecimiento de las plantas (Kabilan *et al.* 2025). El efecto de las nanopartículas en las plantas depende de factores como

la dosis, el tipo, el tamaño, la concentración, las propiedades fisicoquímicas y las características del cultivo (Rodríguez-Jurado *et al.* 2025). Por ello la aplicación de CaCO₃NPs como fuente de calcio en la nutrición vegetal puede incrementar su biodisponibilidad y optimizar los procesos fisiológicos en los que este elemento participe (Motlhalamme *et al.* 2025). Se ha demostrado el efecto de diferentes nanopartículas en el desarrollo y el crecimiento de la radícula de cultivos como arroz, maíz, trigo, cebada y tomate (Bhatia *et al.* 2025).

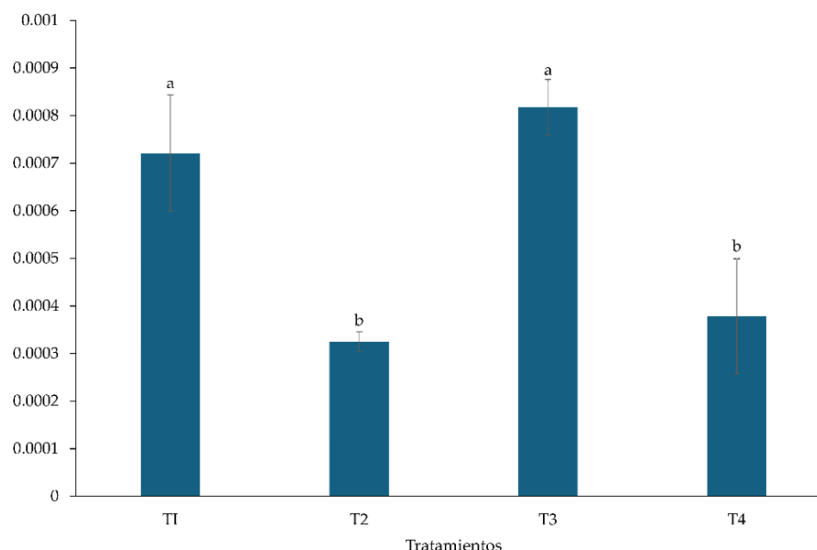


Figura 6. Efecto de CaCO₃NPs en el ICD. Tratamientos: T1 = Control (agua destilada); T2 = 100 mg L⁻¹; T3 = 200 mg L⁻¹; T4 = 300 mg L⁻¹. Letras iguales indican no diferencias significativas entre tratamientos (Tukey, P < 0.05).

En un estudio donde fueron aplicadas CaCO₃NPs en *Cicer arietinum* L., aumentó la longitud de radícula a 137.7 ± 0.29 mm con una concentración de 30 mg L⁻¹, en comparación con el control (116.70 ± 0.41 mm) (Koley *et al.* 2025). En *R. sativus*, las nanopartículas de óxido de Zinc (ZnO) aplicadas a 100 mg L⁻¹ incrementaron la longitud de la radícula hasta 850 mm y conforme la concentración disminuyó (10 y 50 mg L⁻¹) los valores aumentaron, lo que sugiere que el efecto promotor del crecimiento es mayor a dosis más bajas (Kumar *et al.* 2023). En otro estudio con *R. sativus*, el uso de nanopartículas de óxido de cobre (CuO) a 3.5 mg mL⁻¹ aumentaron significativamente el vigor de las plántulas, con una longitud total promedio de 131.0 ± 0.6 mm. Sin embargo, existen reportes que indican que concentraciones de 2.30 mg mL⁻¹ de nanopartículas de zeolita modificada (nZH-Cu) causaron efectos fitotóxicos y redujeron el crecimiento a 64.0 ± 0.97 mm. Estos hallazgos resaltan la importancia de optimizar la concentración de nanopartículas para evitar efectos negativos sobre el crecimiento vegetal (Ahumada-Rudolph *et al.* 2025). De la misma manera, en la altura de *Dahlia pinnata* hubo un incremento al aplicar nanopartículas de dióxido de silicio (SiO₂) a 90 mg L⁻¹ en comparación con 180 mg L⁻¹. En contraste, las CaCO₃NPs promovieron un aumento significativo en la altura conforme se incrementó la concentración de 500 a 1 000 mg L⁻¹ (Kasem *et al.* 2023).

Los efectos bioestimulantes de los nanomateriales en las plantas se deben principalmente a su interacción con las paredes y membranas celulares, lo que activa señales internas que modifican la

expresión génica. Adicionalmente, los elementos presentes en el núcleo del nanomaterial pueden participar directamente en procesos metabólicos esenciales. Como resultado, se ha observado un aumento en la fotosíntesis, la actividad antioxidante, y la absorción de nutrientes, lo que favorece el crecimiento vegetal, la acumulación de biomasa y la tolerancia al estrés (Garza-Alonso *et al.* 2023a). En este contexto, el calcio es uno de los elementos frecuentemente incorporados en nanomateriales funcionales e interviene en la biosíntesis de metabolitos secundarios, lo que refuerza el desarrollo vegetal. También cumple funciones estructurales en la pared celular y la membrana plasmática, actúa como contracción de aniones en la vacuola y participa como mensajero intracelular en el citosol (Motthalamme *et al.* 2025).

Acumulación de biomasa / Materia seca

En semillas de trigo, el peso seco de la raíz aumentó con 50, 100 y 150 mg L⁻¹ de nanopartículas de quitosano-zinc-ácido salicílico (CS-Zn-SA) en comparación con el control, pero cuando la concentración fue de 200 mg L⁻¹ el peso fue menor al control (Sahu *et al.* 2023). También se ha reportado que las nanopartículas de óxido de hierro (Fe₂O₃) actúan como bioestimulantes en *R. sativus*, al incrementar significativamente la biomasa fresca y seca de las plantas. Este efecto se atribuye a la mejora de la tasa fotosintética, resultado de una optimización en los parámetros del intercambio gaseoso, lo cual favorece el crecimiento (Garza-Alonso *et al.* 2023a).

Al evaluar las nanopartículas de ZnO biosintetizadas con extracto de *Linum usitatissimum* y *Lemna minor* en propagación in vitro de plántulas, se obtuvo un incremento en el peso fresco y seco. De igual manera hubo resultados positivos con las nanopartículas de plata al estimular el peso fresco y seco de plantas (Tolisano y Del-Buono 2023). Asimismo, la aplicación de nanopartículas de ZnO favoreció la ganancia de materia fresca y seca en plantas de lechuga (Garza-Alonso *et al.* 2023b). Sin embargo, al evaluar el efecto de nanopartículas de óxido de hierro (Fe₃O₄) y también de magnetita y plata (Fe₃O₄/Ag) en avena y *R. sativus*, la mayoría de las formulaciones no modificaron significativamente el peso seco de las plantas en comparación con el control, solamente hubo ligeros incrementos a concentraciones elevadas y efectos dependientes del tipo de nanopartícula (Klekotka *et al.* 2022).

Diámetro de hipocótilo

Las CaCO₃NPs han mostrado favorecer el diámetro del tallo en diversas especies vegetales, lo cual se asocia a cambios fisiológicos y morfológicos derivados de su interacción con los tejidos de la planta. En lechuga, los tratamientos con 100 y 200 mg L⁻¹ incrementaron el diámetro de las cabezas en aproximadamente 13.3 y 18.9%, respectivamente, en comparación con el control (Salama *et al.* 2024). En *Dahlia pinnata*, la aplicación de CaCO₃NPs también incrementó el diámetro conforme aumentó la concentración de 500 a 1000 mg L⁻¹, alcanzando hasta 18 mm (Kasem *et al.* 2023). De igual forma, en plántulas de *Triticum aestivum* L., los tratamientos de 200 y 400 mg L⁻¹ aumentaron el diámetro del tallo en 15.4 y 17.5% respecto al control (Gao *et al.* 2023).

En plantas de *Cycas revoluta*, la aplicación de CaCO₃NPs incrementó el diámetro de 92.4 mm en el tratamiento control hasta 106.9 mm con 200 mg L⁻¹ (15.7%), mientras que la concentración de 10 000 mg L⁻¹ alcanzó un valor de 158 mm, equivalente a un incremento del 71.0% (Sorour 2021).

Índice de Calidad de Dickson

El ICD integra parámetros como biomasa, vigor y crecimiento radicular, por lo que se considera un indicador de la calidad de las plántulas. Diversos estudios muestran que algunas nanopartículas pueden favorecer el desarrollo vegetal y la eficiencia fisiológica, lo que se refleja en un mayor vigor y calidad de las plantas. Sin embargo, su efecto depende del tipo y la concentración, ya que algunas nanopartículas como las de ZnO o plata, pueden afectar procesos como la fotosíntesis y, en consecuencia, reducir el valor del ICD (Poddar *et al.* 2020). En contraste, las nanopartículas de sílice mejoran el crecimiento vegetal, la biomasa general y la resistencia frente al estrés abiótico, ayudando a mejorar la calidad del cultivo (Manokari *et al.* 2023, Riaz *et al.* 2022).

Los resultados de este estudio coinciden con reportes previos donde diferentes bioestimulantes modifican la calidad en las plántulas. Al evaluar el efecto de *Azospirillum brasilense* (cepas Abv05 y Abv06), *Bacillus subtilis* BRM2084 y cepas de *Bacillus megaterium* en plántulas de *Araucaria angustifolia* durante 215 días de crecimiento, los resultados mostraron que las plántulas inoculadas con estas bacterias presentaron un ICD de 0.3, mientras que las no inoculadas alcanzaron un valor superior de 0.5 (Kondo *et al.* 2024). En plántulas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.), el uso de *Chlorella vulgaris* como bioestimulante, combinado con la adición de vitamina B3, también generó diferencias significativas en el ICD. El tratamiento control registró 0.0025, mientras que la combinación de la microalga con la vitamina incrementó el índice a 0.0046 (Ferreira *et al.* 2024). El ICD es un indicador útil de la calidad de las plántulas, ya que se relaciona con el contenido de nitrógeno y fósforo en sus tejidos. Este índice refleja la robustez y el equilibrio en la distribución de biomasa, lo cual se traduce en un crecimiento vigoroso, un sistema radicular desarrollado y una mejor adaptación tras el trasplante (Kondo *et al.* 2024).

Los resultados sugieren que la aplicación de CaCO₃NPs puede influir en la calidad de las plántulas de *R. sativus*. La concentración de 200 mg L⁻¹ fue la más favorable, al mantener un equilibrio entre crecimiento y acumulación de biomasa, lo que se reflejó en un mayor ICD. Estos resultados sugieren que el efecto de las nanopartículas depende de la dosis empleada y resaltan la importancia de ajustar su aplicación para maximizar los beneficios en etapas tempranas del desarrollo.

CONCLUSIONES

Las nanopartículas de carbonato de calcio modificaron el crecimiento inicial de *Raphanus sativus* en función de la concentración aplicada. Las dosis de 200 y 300 mg L⁻¹ favorecieron la elongación de la radícula y la longitud total de las plántulas, mientras que los tratamientos con nanopartículas presentaron menores porcentajes de materia seca respecto al control. La concentración de 200 mg L⁻¹ mantuvo un índice de calidad de Dickson similar al del control, lo que sugiere una respuesta diferenciada entre crecimiento longitudinal y acumulación de biomasa. Estos resultados requieren validación en etapas posteriores del cultivo y mediante controles que permitan distinguir los efectos del calcio de aquellos asociados específicamente con la nanoformulación.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

- Abadía MB, Castillo LA, Alonso YN, Monterubbianesi MG, Maciel G, Bartosik RE (2024) Germination and vigor of maize seeds: Pilot-scale comparison of low-oxygen and traditional storage methods. *Agriculture* 14: 1268. <https://doi.org/10.3390/agriculture14081268>
- Ahumada-Rudolph R, Nova M, Novoa V, Vergara-Figueroa J, Méndez P, Cabrera-Pardo J, González S, Cespedes-Acuña CL (2025) Advancing agricultural sustainability: Nanoparticles and zeolites for pathogenic fungal control and seed germination. *Food Bioscience* 68: 106409. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106409>
- Ali Q, Ali M, Jing H, Hussain A, Manghwar H, Ali M, Raza W, Mundra S (2024) Power of plant microbiome: A sustainable approach for agricultural resilience. *Plant Stress* 14: 100681. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100681>
- Bhardwaj S, Verma T, Kour J, Singh AD, Bhardwaj R, Sharma NR, Ansari S, Raza A, Prasad PVV, Thakur U, Kapoor D (2024) Silicon and nitric oxide modulate growth attributes, antioxidant defense system and osmolytes accumulation in radish (*Raphanus sativus* L.) under arsenic toxicity. *Plant Stress* 12: 100473. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100473>
- Bhatia A, Khatri A, Yadav M, Kumari A, Mona S, Rachna B (2025) Potential of iron oxide nanoparticles in enhancing growth and development of plants: A review. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 139: 102746. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2025.102746>
- Di Benedetto A, Tognetti J (2016) Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: Su aplicación a cultivos intensivos. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 42(3): 258-282.
- Dickson A, Leaf AL, Hosner JF (1960) Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. *The Forestry Chronicle* 36: 10-13. <https://doi.org/10.5558/tfc36010-1>
- Ferreira ES, Binotti FFS, Binotti EDC, Costa E, Vendruscolo EP, Lima SF, Coli Neto FA (2024) Potentiating *Chlorella vulgaris* bioinput as a growth biostimulant in the production of basil seedlings with the addition of vitamin B3. *Algal Research* 83: 103706. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103706>
- Ende S, Henjes J, Spiller M, Elshobary M, Hanelt D, Abomohra A (2024) Recent advances in recirculating aquaculture systems and role of microalgae to close system loop. *Bioresource Technology* 407: 131107. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131107>
- Esquivias-Fierro A, González-López JR, Chávez-Guerrero L (2021) Surface-assisted crystallization of highly pure CaCO₃ films using bagasse ash as a raw material. *Waste and Biomass Valorization* 12(3): 1591-1597. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01121-2>
- Gao Y, Chen S, Li Y, Shi Y (2023) Effect of nano-calcium carbonate on morphology, antioxidant enzyme activity and photosynthetic parameters of wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* 10: 31. <https://doi.org/10.1186/s40538-023-00404-9>
- Garza-Alonso CA, Cadenas-Pliego G, Juárez-Maldonado A, González-Fuentes JA, Tortella G, Benavides-Mendoza A (2023a) Fe₂O₃ nanoparticles can replace Fe-EDTA fertilizer and boost the productivity and quality of *Raphanus sativus* in a soilless system. *Scientia Horticulturae* 321: 112261. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112261>
- Garza-Alonso CA, Juárez-Maldonado A, González-Morales S, Cabrera-De la Fuente M, Cadenas-Pliego G, Morales-Díaz AB, Trejo-Tellez LI, Tortella G, Benavides-Mendoza A (2023b) ZnO nanoparticles as potential fertilizer and biostimulant for lettuce. *Heliyon* 9: e12787. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12787>

- INEGI (2019) Marco Geoestadístico, septiembre 2019. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Aguascalientes, México.
- Jan B, Bhat MA, Bhat TA, Nazir A, Dar KA, Kamran M, Soufan W, Abdelhamid MT, El-Sabagh A (2023) Measuring the influence of seedling age and nutrient sources on the performance of sweet corn (*Zea mays* L.) under temperate climatic conditions. *ACS Omega* 8 (21): 18981-18989. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01518>
- Kabilan M, Sakthivel N, Rajkishore SK, Ramah K, Rajeswari R, Surendrakumar A, Srimathi K, Vasumathi V (2025) Advancements in the realm of calcium nanoparticles: An in-depth exploration of synthesis, characterization and multifaceted applications in agriculture. *Plant Science Today* 12(Sp1): 1-13. <https://doi.org/10.14719/pst.7518>
- Kasem MM, El-Baset MMA, Helaly AA, El-Boraie EA, Alqahtani MD, Alhashimi A, Abu-Elsaoud AM, Elkeshish A, Mancy AG, Alhumaid A, El-Banna MF (2023) Pre and postharvest characteristics of *Dahlia pinnata* var. *pinnata*, cav. As affected by SiO₂ and CaCO₃ nanoparticles under two different planting dates. *Heliyon* 9: e17292. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17292>
- Klekotka U, Rogacz D, Szymanek I, Malejko J, Rychter P, Kalska-Szostko B (2022) Ecotoxicological assessment of magnetite and magnetite/ Ag nanoparticles on terrestrial and aquatic biota from different trophic levels. *Chemosphere* 308: 136207. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136207>
- Koley R, Mandal M, Mondal A, Debnath P, Mondal A, Mondal NK (2025) Synthesis of calcium carbonate nanoparticles from mollusc shell waste and its efficacy towards plant growth and development. *Sustainable Chemistry One World* 6: 100056. <https://doi.org/10.1016/j.scowo.2025.100056>
- Kondo YR, da Cruz SP, Chanway C, Kaschuk G (2024) Inoculation with *Azospirillum brasilense* or *Bacillus* spp. improves root growth and nutritional quality of araucaria (*Araucaria angustifolia*) seedlings. *Forest Ecology and Management* 568: 122092. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122092>
- Kumar A, Verma LM, Sharma S, Singh N (2023) Zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) stabilized by phyto cellulose derived biopolymer and their bipartite interaction studies with agriculturally important microbes / *Raphanus sativus* L. seeds. *Ceramics International* 49(24PA): 39771-39787. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.07.179>
- Mahawar L, Živčák M, Barboricova M, Kovár M, Filaček A, Ferencova J, Vysoká DM, Brestič M (2024) Effect of copper oxide and zinc oxide nanoparticles on photosynthesis and physiology of *Raphanus sativus* L. under salinity stress. *Plant Physiology and Biochemistry* 206: 108281. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108281>
- Manokari M, Dey A, Faisal M, Alatar AA, Singh RK, Shekhawat MS (2023) Silicon nanoparticles (SiNPs) positively affect morpho-structural differentiation in micropropagated plantlets of *Santalum album* L. *Silicon* 15: 6843-6850. <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02558-5>
- Mazepa E, Malburg BV, Mógor G, de Oliveira AC, Amatuzzi JO, Corrêa DO, Lemos JS, Ducatti DRB, Duarte MER, Mógor AF, Noseda MD (2021) Plant growth biostimulant activity of the green microalga *Desmodesmus subspicatus*. *Algal Research* 59: 102434. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102434>
- Mazhar MW, Ishtiaq M, Maqbool M, Akram R (2022) Seed priming with Calcium oxide nanoparticles improves germination, biomass, antioxidant defence and yield traits of canola plants under drought stress. *South African Journal of Botany* 151: 889-899. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.11.017>
- Minaoui F, Hakkoum Z, Chabili A, Douma M, Mouhri K, Loudiki M (2024) Biostimulant effect of green soil microalgae *Chlorella vulgaris* suspensions on germination and growth of wheat (*Triticum aestivum* var. Achtar) and soil fertility. *Algal Research* 82: 103655. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103655>
- Motilhamme T, Kaningini AG, Thema FT, Mohale KC, Maaza M (2025) Nanotechnology in agriculture: Exploring the influence of calcium carbonate nanoparticles on tomato leaf and fruit metabolomic profiles. *South African Journal of Botany* 180: 615-624. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2025.03.028>

- Poddar K, Sarkar D, Sarkar A (2020) Nanoparticles on photosynthesis of plants. In: Patra JK, Fraceto LF, Das G, Campos EVR (eds) Effects and role of green nanoparticles: Synthesis and biomedical applications. Springer International Publishing. Cham. pp. 273-287. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39246-8_13
- Riaz S, Hussain I, Parveen A, Ashraf MA, Rasheed R, Zulfiqar S, Thind S, Rehman S (2022) Silicon and nano-silicon in plant nutrition and crop quality. In: Etesami H, Al-Saeedi AH, El-Ramady H, Fujita M, Pessarakli M, Anwar-Hossain MBTS (eds) Silicon and nano-silicon in environmental stress management and crop quality improvement. Academic Press. pp. 277-295. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91225-9.00021-2>
- Rodríguez-Jurado S, Guevara-González RG, Aguirre-Becerra H, Esquivel-Escalante K, Feregrino-Pérez AA (2025) Nanoparticles as potential eustressors in plants. *Agronomy* 15: 2186. <https://doi.org/10.3390/agronomy15092186>
- Rutkowski M, Krzemińska-Fiedorowicz L, Khachatryan K, Khachatryan G, Kalisz A, Sękara A (2024) Impact of silver nanoparticles in alginate gels on seed germination, growth and stress biochemical parameters of cucumber seedlings. *Plant Stress* 12: 100491. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100491>
- Sahu S, Gautam S, Singh A, Lohani P, Sharma C, Pathak P, Kumar A, Singh H (2023) Synthesis and characterization of chitosan-zinc-salicylic acid nanoparticles: A plant biostimulant. *International Journal of Biological Macromolecules* 253: 127602. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127602>
- Salama DM, Osman SA, Mahmoud SH, El-Tanahy AMM, El-aziz MEA (2024) Improving the productivity and physiological characteristics of lettuce plants using spraying calcium as a nanofertilizer. *Horticulturae* 10: 1157. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10111157>
- Santás-Miguel V, Arias-Estévez M, Rodríguez-Seijo A, Arenas-Lago D (2023) Use of metal nanoparticles in agriculture. A review on the effects on plant germination. *Environmental Pollution* 334: 122222. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122222>
- SIAP (2026) Cierre de la producción agrícola 2023 y 2024. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Acciones y Programas. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/. Fecha de consulta: 15 de febrero de 2026.
- Sorour MA (2021) Enhancing *Cycas revoluta* Thumb. Growth by calcium carbonate nanoparticles under water deficit stress condition. *Scientific Journal Flowers & Ornamental Plants* 8(1): 39-54. <https://doi.org/10.21608/sjofop.2021.155058>
- Taheri N, Pishvaei MS, Jahani H, Zakeri D (2024) Towards sustainable resource allocation in agriculture: A systematic review on cropping pattern optimization approaches. *Applied Soft Computing Journal* 167: 112360. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.112360>
- Tamindžić G, Ignjatov M, Miljković D, Červenski J, Milošević D, Nikolić Z, Vasiljević S (2023) Seed priming treatments to improve heat stress tolerance of garden pea (*Pisum sativum* L.). *Agriculture* 13: 439. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020439>
- Tolisano C, Del-Buono D (2023) Biobased: Biostimulants and biogenic nanoparticles enter the scene. *Science of the Total Environment* 885: 163912. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163912>
- Tyagi L, Kadono H, Rajagopalan UM (2025) Rapid size-dependent impact of Cu and CuO nanoparticles on lentil seeds and leaves using biospeckle optical coherence tomography. *Nanomaterials* 15: 1214. <https://doi.org/10.3390/nano15161214>
- Zamora-Ledezma E, Aragundi GLL, Guamán Marquines WS, Macías Pro MA, García Díaz JV, Pacheco Gil HA, Londoño JMB, Londoño MAB, Zamora-Ledezma C (2025) Phytotoxic effects and agricultural potential of nanofertilizers: A study using zeolite, zinc oxide, and titanium dioxide under controlled conditions. *Journal of Xenobiotics* 15: 123. <https://doi.org/10.3390/jox15040123>