

Efecto de nanopartículas de óxido de zinc sobre el desarrollo del rábano en sustratos orgánicos

Magín González-Moscoso¹

Juan Diego Camacho-Ovando²

Gregorio Cadenas-Pliego³

Juan Carlos Caballero-Salinas^{2,§}

1 Departamento de Nanotecnología-Universidad Politécnica de Chiapas. Carretera Tuxtla Gutiérrez-Portillo Zaragoza km 21+500, Col. Las Brisas, Suchiapa, Chiapas, México. CP. 29150. (magingonmos@gmail.com).

2 Centro Académico Regional Chiapas-Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Prolongación avenida Benito Juárez s/n, Rancho La Concordia, Cintalapa, Chiapas, México. CP. 30400. (camachodiego716@gmail.com).

3 Centro de Investigación en Química Aplicada. Boulevard Enrique Reyna Hermosillo 140, Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México. CP. 25253. (gregorio.cadenas@ciqa.edu.mx).

Autor para correspondencia: jccs.uaaan@gmail.com.

Resumen

En las últimas décadas, la nanotecnología aplicada a la agricultura ha despertado un considerable interés debido a su potencial para impulsar el crecimiento y la productividad de los cultivos. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de diferentes concentraciones de nanopartículas de óxido de zinc aplicadas a plantas de rábano cultivadas bajo diferentes sustratos orgánicos en condiciones de microtúnel. La investigación se realizó en el Centro Académico Regional Chiapas de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en el año 2023. Se utilizó un diseño al azar con nueve tratamientos y cinco repeticiones (dos plantas por repetición). Los sustratos utilizados fueron el suelo común, humus de lombriz y bocashi. Durante el desarrollo del cultivo se realizaron tres aplicaciones de nanopartículas de óxido de zinc de 5 ml por planta vía suelo, en concentraciones de 0, 10 y 20 mg L⁻¹. Se estimaron variables morfológicas, de biomasa fresca y seca, que se asocian directamente con el rendimiento. Los resultados mostraron diferencias estadísticas en 10 de las 12 variables evaluadas. Los mejores valores fueron obtenidos en los tratamientos T5 y T8, que representan el humus de lombriz en combinación con 10 y 20 mg L⁻¹ de nanopartículas de óxido de zinc, respectivamente. Por lo contrario, los tratamientos (T7 y T9) que se cultivaron en el sustrato de bocashi en combinación con nanopartículas de óxido de zinc presentaron los valores más bajos, incluso comparado con el control. Es importante seguir explorando las interacciones que ocurren entre las nanopartículas con los diferentes sustratos orgánicos y las respuestas de los cultivos agrícolas.

Palabras clave:

Raphanus sativus L., nanomateriales, óxido de zinc, sustratos orgánicos.



License (open-access): Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia **Creative Commons**

Introducción

A nivel mundial, se pierden anualmente 12 millones de hectáreas de suelo agrícola debido a la degradación provocada por diversos factores, incluyendo el uso excesivo de agroquímicos (Liu *et al.*, 2021). En este contexto, los abonos orgánicos han ganado una gran relevancia por su capacidad para restaurar las tierras degradadas, ofrecer beneficios ambientales y proporcionar nutrientes esenciales a las plantas (Lestari *et al.*, 2024).

La eficacia de diversos materiales orgánicos, como el estiércol de ganado, la composta, los biosólidos y el biocarbón, para incrementar los niveles de carbono en el suelo, ha sido ampliamente documentada en la literatura científica (Diacono y Montemurro, 2011). Recientemente, la nanotecnología ha emergido como una herramienta en la agricultura, ofreciendo una alternativa a las tecnologías convencionales (Nguyen *et al.*, 2024). Su uso comprende desde la germinación de semillas, el desarrollo de las plantas, poscosecha, hasta el almacenamiento y transporte de los productos agrícolas (Saritha *et al.*, 2022).

En este sentido, se sigue explorando el potencial de los nanomateriales como posibles nanofertilizantes como una alternativa a los fertilizantes sintéticos (Semenova *et al.*, 2024). Las nanopartículas, debido a su menor tamaño y mayor área de superficie, poseen propiedades únicas como magnetismo, conductividad eléctrica, resistencia física y efectos ópticos (Singh *et al.*, 2023). Entre las diferentes nanopartículas, las de óxido de zinc se han destacado por sus aplicaciones agrícolas, como nanofertilizantes, nanopesticidas, nanosensores y como antioxidante para mejorar la protección de los cultivos (Priyanka *et al.*, 2019).

Estas partículas mejoran parámetros agronómicos bajo condiciones normales y frente a estrés ambiental (Mazhar *et al.*, 2022), debido a que el zinc es crucial para la división celular, la síntesis de clorofila y proteínas y el metabolismo de ácidos nucleicos y carbohidratos en plantas (Rehman *et al.*, 2012). Estudios recientes mostraron que la aplicación de NPs de Zn en los cultivos aumenta el porcentaje de germinación (Sarkhosh *et al.*, 2022), mejoran el contenido de clorofila (Ahmed *et al.*, 2024) y promueven el crecimiento (Mahawar *et al.*, 2024).

Esta investigación examinó las interacciones entre las nanopartículas de óxido de zinc (NPs ZnO) y diferentes sustratos orgánicos, como el humus de lombriz y el bocashi y su efecto en el cultivo del rábano (*Raphanus sativus* L.). El rábano es un cultivo vegetal de importancia económica que se cultiva en diversas regiones del mundo, su parte comestible (bulbo) se desarrolla en el suelo y es una fuente rica en calcio, fósforo, potasio, vitaminas y compuestos polifenólicos (Gui *et al.*, 2017; Mahawar *et al.*, 2024).

La producción anual de rábano se estima en siete millones de toneladas por año, representa el 2% de la producción total de hortalizas en el mundo. Se proyecta que la superficie sembrada se incrementará en zonas tropicales debido a tolerancia a condiciones ambientales adversas y su ciclo de corta duración (CABI, 2019). Además, investigaciones sugieren que una fertilización óptima mejora el rendimiento y la calidad del bulbo (Zhang *et al.*, 2019), por lo que es relevante explorar tecnologías que incrementen la productividad y la calidad con un menor impacto ambiental. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la aplicación de diferentes concentraciones de NPs ZnO vía drench en el crecimiento y rendimiento de *Raphanus sativus* L., en los sustratos de tierra común, humus de lombriz y bocashi.

Materiales y métodos

La investigación se desarrolló en las instalaciones del Centro Académico Regional Chiapas (CAR)-Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAN). Se localiza en el municipio de Cintalapa en el oeste del estado de Chiapas, en el sur de México. Sus coordenadas geográficas son 16° 39' latitud norte y 93° 44' longitud oeste, a una altitud es de 540 m. Predomina el clima semicálido subhúmedo con una temperatura media de 24.5 °C y una precipitación promedio anual de 800 mm.

El experimento se llevó a cabo en un microtúnel con cubierta de malla antiáfidos. La siembra se realizó el 17 de octubre de 2023, se utilizó la variedad de rábano Champion. En cada bolsa de polietileno de 10 x 30 cm se sembraron dos semillas. Durante el desarrollo del cultivo se aplicó riego directo con base a los requerimientos de la planta.

Diseño experimental y tratamientos

Se utilizó un diseño completamente aleatorizado (DCA) compuesto por nueve tratamientos y cinco réplicas. Los tratamientos se definieron con base a los diferentes sustratos (suelo común, bocashi y humus de lombriz) y diferentes concentraciones de nanopartículas de óxido de zinc (0, 10 y 20 mg L⁻¹) (Cuadro 1). Cada repetición fue representada por dos plantas de rábano (10 por tratamiento). Las bolsas se distribuyeron en el microtúnel a una distancia de 15 cm entre bolsas y 40 entre filas.

Cuadro 1. Tratamientos con diferentes sustratos y concentraciones de NPs ZnO.

Tratamiento	Descripción
T1	Suelo común
T2	Humus de lombriz
T3	Bocashi
T4	Suelo+10 mg L ⁻¹ NPs ZnO
T5	Humus+10 mg L ⁻¹ NPs ZnO
T6	Bocashi+10 mg L ⁻¹ NPs ZnO
T7	Suelo+20 mg L ⁻¹ NPs ZnO
T8	Humus+20 mg L ⁻¹ NPs ZnO
T9	Bocashi+20 mg L ⁻¹ NPs ZnO

Preparación y aplicación de nanopartículas de óxido de zinc

Las NPs ZnO fueron sintetizadas y otorgadas por el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) ubicado en Saltillo, Coahuila, México. La morfología y estructura de las nanopartículas fueron analizadas mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM) y microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM), mostrando nanopartículas cuasi esféricas, con un diámetro promedio de 16.49 nm y apariencia cristalina (Garza-Alonso *et al.*, 2023).

Las NPs ZnO se obtienen funcionalizadas con ácido cítrico para mejorar su dispersión en medios acuosos, el valor del potencial Zeta obtenido en agua destilada fue de -64.6 ± 0.1 mV (Toledo-Manuel *et al.*, 2024). La preparación de las NPs ZnO se realizó en el laboratorio de ciencias básicas del CAR. Primero, se dispersaron 10 mg de NPs ZnO en un litro de agua destilada. Posteriormente, se añadió el dispersante de la marca AF Óptimos[®] para facilitar la estabilidad y dispersión de las NPs ZnO en la solución.

Este mismo proceso se repitió para la preparación de la dosis de 20 mg de NPs ZnO. La solución de NPs ZnO se aplicó con una jeringa a una dosis de 5 ml por planta (10 ml por repetición) vía drench. Se realizaron tres aplicaciones, a los 11, 19 y 26 días después de la siembra (DDS).

Variables de respuesta evaluadas y análisis de datos

Durante el desarrollo del experimento se realizaron cuatro registros de datos para determinar los efectos de las nanopartículas en diferentes parámetros de crecimiento y rendimiento del rábano. En los primeros tres (11, 19 y 26 DDS) se registraron datos morfológicos de la planta, como las variables: altura de planta (AP), número de hojas (NH) y diámetro de tallo (DT). En la cosecha, 34 DDS, se estimaron las variables diámetro de bulbo (DB), longitud de bulbo (LB), longitud de raíz (LR).

Posteriormente, se cortó la raíz, bulbo y hojas de las plantas de rábano para calcular la masa fresca de raíz (MFR), masa fresca de hojas (MFH) y masa fresca de tubérculo (MFT). También se

calculó la masa seca de raíz (MSR), masa seca de hojas (MSH) y masa seca de tubérculo (MST). Para ello, la raíz, bulbo y hojas fueron secadas en una estufa Ecoshel modelo 9052 a 70 °C de temperatura por un tiempo de 48 h.

El peso fresco y seco de las variables evaluadas se obtuvieron con una balanza analítica de precisión VE-204. Las mediciones AP, LB, LR se realizó con una regla graduada, mientras que DT, DB con un vernier manual. Los datos colectados se sometieron a un análisis de varianza (Anova). La homogeneidad de varianzas de cada variable de respuesta se verificó con la prueba de Bartlett y Levene. También, se aplicó la prueba de comparación de medias con Tukey ($p \leq 0.05$) utilizando el paquete estadístico SAS® Studio.

Resultados y discusión

En las variables que se evaluó la morfología de las plantas (AP, NH y DT) se observó diferencias estadísticas significativas en NH y DT (Cuadro 2). En cuanto a la variable NH, los tratamientos de humus en combinación con las dos dosis de NPs ZnO (10 y 20 mg L⁻¹) expresaron los valores más altos, aunque fueron estadísticamente igual a seis de los tratamientos evaluados. Esta misma tendencia se observó en el DT, los tratamientos con humus revelaron un mayor diámetro de tallo. En ambas variables (NH y DM), los menores valores se presentaron en T9 (bocashi + 20 mg L⁻¹ NPs ZnO).

Cuadro 2. Efecto de las NPs ZnO en la morfología de plantas de rábano en los diferentes sustratos evaluados.

Tratamientos	AP (cm)	NH	DT (mm)
T1: Suelo	26.44 ± 3.61 ^a	8.55 ± 1.13 ^{ab}	0.93 ± 0.13 ^{ab}
T2: Humus	24 ± 2.34 ^a	8.6 ± 1.07 ^{ab}	1.04 ± 0.21 ^{ab}
T3: Bocashi	22.93 ± 1.89 ^a	8.2 ± 1.22 ^{ab}	0.8 ± 0.2 ^{ab}
T4: Suelo+10 mg L ⁻¹ NPs ZnO	22.75 ± 5.82 ^a	7.9 ± 1.19 ^{ab}	0.82 ± 0.33 ^{ab}
T5: Humus+10 mg L ⁻¹ NPs ZnO	24.65 ± 3.8 ^a	9.1 ± 1.72 ^a	1.03 ± 0.25 ^{ab}
T6: Bocashi+10 mg L ⁻¹ NPs ZnO	21.99 ± 2.29 ^a	8 ± 0.81 ^{ab}	0.81 ± 0.23 ^{ab}
T7: Suelo+20 mg L ⁻¹ NPs ZnO	22.11 ± 3.2 ^a	7.77 ± 0.83 ^{ab}	0.72 ± 0.28 ^{ab}
T8: Humus+20 mg L ⁻¹ NPs ZnO	26.20 ± 5.38 ^a	9.2 ± 1.39 ^a	1.08 ± 0.34 ^a
T9: Bocashi+20 mg L ⁻¹ NPs ZnO	22.27 ± 3.08 ^a	7 ± 1.5 ^b	0.67 ± 0.26 ^b

Medias con letra diferente en las columnas indican diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0.05$). AP= altura de planta; NH= número de hojas; DT= diámetro de tallo.

El bocashi es un fertilizante que suministra macro y micronutrientes al suelo, los cuales son absorbidos por las plantas. Sin embargo, su efectividad varía en función de los materiales empleados en su elaboración (Mendivil-Lugo *et al.*, 2020). Por otra parte, se ha reportado que el humus tiene un efecto positivo en los indicadores de crecimiento en plantas de menta (*Eruca sativa* Mill.) y de rúcula (*Menta piperita* L.) (Romero-Figueroa *et al.*, 2013; Blanco-Villacorta, 2019). Los efectos positivos se deben a que el humus incrementó la fertilidad de los suelos y contribuye al desarrollo de microorganismos benéficos (Lata-Álvarez y Llerena-Ramos, 2022).

En cuanto a las concentraciones de NPs ZnO, Magdaleno-García *et al.* (2023) reportaron que la aplicación de 100 mg L⁻¹ de NPs ZnO incrementó la altura de planta, el número de hojas y el diámetro de tallo en plántulas de chile morrón (*Capsicum annum* L.). Por su parte, Fortis-Hernández *et al.* (2022) reportaron que las NPs de ZnO en concentraciones de 20 y 25 mg L⁻¹ provocó un incremento en la altura, tamaño de hojas, perímetro de copa, peso fresco en el cultivo de lechuga.

En este sentido, se pudo encontrar efectos positivos tanto en bajas y altas concentraciones. Sin embargo, el efecto estimulante de las nanopartículas en las plantas no solo depende de su concentración, sino también de su composición, tamaño, propiedades fisicoquímicas y de la especie vegetal (Juárez-Maldonado *et al.*, 2019). En relación con las variables de bulbo, mostraron

diferencias estadísticas en las tres variables evaluadas (Cuadro 3). El T3 que utilizó únicamente bocashi presentó el DB de menor tamaño en un 29% comparado con el control, el resto de los tratamientos fueron estadísticamente igual al tratamiento control.

Cuadro 3. Efecto de las NPs ZnO en las variables del bulbo de rábano en los diferentes sustratos evaluados.

Tratamientos	DB (cm)	LB (cm)	LR (cm)
T1: Suelo	3.67 ±0.58 ^a	4.31 ±0.66 ^{ab}	9.55 ±3.46 ^{ab}
T2: Humus	3.88 ±0.72 ^a	4.47 ±0.8 ^{ab}	8.11 ±2.97 ^{ab}
T3: Bocashi	2.6 ±0.81 ^b	3.48 ±0.93 ^b	6.14 ±1.8 ^b
T4: Suelo+10 mg L ⁻¹ NPs ZnO	3.07 ±0.78 ^{ab}	3.85 ±0.49 ^{ab}	8.05 ±1.69 ^{ab}
T5: Humus+10 mg L ⁻¹ NPs ZnO	3.97 ±0.96 ^a	5 ±0.83 ^a	10.75 ±3.11 ^a
T6: Bocashi+10 mg L ⁻¹ NPs ZnO	3.36 ±0.46 ^{ab}	3.91 ±0.76 ^{ab}	6.69 ±1.44 ^b
T7: Suelo+20 mg L ⁻¹ NPs ZnO	3.25 ±0.64 ^{ab}	3.85 ±0.82 ^{ab}	7.22 ±2.52 ^{ab}
T8: Humus+20 mg L ⁻¹ NPs ZnO	3.83 ±0.72 ^a	4.42 ±1.63 ^{ab}	9.76 ±3.47 ^{ab}
T9: Bocashi+20 mg L ⁻¹ NPs ZnO	2.93 ±0.57 ^{ab}	3.68 ±1.02 ^{ab}	7.5 ±2.8 ^{ab}

Medias con letra diferente en las columnas indican diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0.05$). DB= diámetro de bulbo; LB= longitud de bulbo; LR= longitud de raíz.

Con respecto a las variables de longitud de bulbo y raíz, se observó la mayor extensión en T5 (humus+10 mg L⁻¹ NPs ZnO). Por otro lado, los tratamientos que presentaron una menor LB y LR fueron T3. El efecto positivo del humus en las variables del bulbo de rábano ha sido reportado por Fleitas *et al.* (2013), mostraron que la aplicación de humus aumenta el diámetro polar y ecuatorial, además, incrementó el peso de los rábanos en comparación con el control.

En el Cuadro 4 se muestra el impacto de las diferentes dosis de NPs ZnO en las variables de biomasa fresca del rábano (MFR, MFH, MFT). Los tratamientos compuestos por el sustrato de bocashi solo (T3) y con la aplicación de 10 y 20 mg L⁻¹ NPs (T8 y T9) mostraron los menores pesos promedios de MFR del 48.55, 46.87 y 31.25% respectivamente, comparado con T1.

Cuadro 4. Producción de materia fresca de rábano sometido a NPs ZnO y abonos orgánicos.

Tratamientos	MFR (g)	MFH (g)	MFT (g)
T1: Suelo	4.16 ±1.17 ^a	20.84 ±6.97 ^a	28.99 ±10.11 ^{abc}
T2: Humus	3.13 ±1.56 ^{ab}	17.05 ±3.84 ^{ab}	34.43 ±8.06 ^{ab}
T3: Bocashi	2.14 ±0.89 ^{ab}	14.74 ±4.02 ^{ab}	16.78 ±6.87 ^c
T4: Suelo + 10 mg L ⁻¹ NPs ZnO	2.01 ±0.62 ^{ab}	12.5 ±4.74 ^b	20.51 ±8.58 ^c
T5: Humus + 10 mg L ⁻¹ NPs ZnO	4.13 ±2.02 ^a	19.23±7.38 ^{ab}	34.12 ±14.05 ^{ab}
T6: Bocashi + 10 mg L ⁻¹ NPs ZnO	2.21 ±0.85 ^{ab}	13.73 ±5.2 ^{ab}	21.04 ± 5.49 ^{ab}
T7: Suelo + 20 mg L ⁻¹ NPs ZnO	3.46 ±1.28 ^{ab}	13.22 ±4.84 ^{ab}	21.87 ±9.22 ^{ab}
T8: Humus + 20 mg L ⁻¹ NPs ZnO	3.14 ±1.37 ^{ab}	20.99 ±7.05 ^a	34.96 ±12.06 ^a
T9: Bocashi + 20 mg L ⁻¹ NPs ZnO	1.3 ±0.33 ^c	11.84 ±3.54 ^b	18.79 ±6.04 ^c

Medias con letra diferente en las columnas indican diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0.05$). MFR= masa fresca raíz; MFH= masa fresca de hojas; MFT= masa fresca de tubérculo.

Con respecto a la variable de MFH los tratamientos T9 (bocashi+20 mg L⁻¹ de NPs ZnO) y T4 (suelo+10 mg L⁻¹ de NPs ZnO) tuvieron los menores pesos promedios de materia fresca en hojas, con 43.18% y 40%, respectivamente, en comparación con el control. Se observó una tendencia de disminución de la MFH en el resto de los tratamientos, aunque sin diferencias estadísticas respecto al control, excepto el de humus+20 mg L⁻¹ de NPs ZnO (T8).

En relación con la variable MFT, los tratamientos en los que se cultivó el rábano con sustrato a base de humus, con o sin nanopartículas, presentaron los valores más altos en el peso promedio. Por lo contrario, los tratamientos T3 y T9 registraron los menores pesos del tubérculo. No obstante, todos los tratamientos fueron estadísticamente iguales al control.

La aplicación de NPs ZnO no mostraron un efecto positivo sobre la producción de biomasa de las plantas de rábano. En contraste, se ha reportado un aumento de la biomasa fresca en plántulas de lechuga (*Lactuca sativa*) con aplicaciones de 50 mg L⁻¹ de NPs ZnO (Galindo-Guzmán *et al.*, 2022). Por otra parte, la aplicación de nanopartículas de Zn puede reducir el crecimiento de las raíces, debido a que se acumulan en ellas y compiten con otros metales que provoca un efecto fitotóxico (Yang *et al.*, 2023).

Asimismo, existen factores que pueden alterar el efecto de las nanopartículas en la promoción del crecimiento, como la dosis empleada, la vía de aplicación y la especie vegetal utilizada (Priyanca *et al.*, 2019). Además, de acuerdo con los hallazgos encontrados que es importante considerar los sustratos o medios en los que establecen los cultivos.

La variable de MSR no mostró diferencias estadísticas entre los tratamientos, aunque el humus combinado con nanopartículas (T5 y T8) presentó los mayores pesos promedios. Por su parte, las variables MSF y MST presentaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos evaluados (Cuadro 5). Se registró una tendencia de menor peso en los tratamientos con bocashi solo y con las dos dosis de NPs ZnO (10 y 20 mg L⁻¹), aunque fueron estadísticamente similares al control.

Cuadro 5. Producción de materia seca de plantas de rábano bajo condiciones de sustratos orgánicos y NPs ZnO.

Tratamientos	MSR (g)	MSF (g)	MST (g)
T1: Suelo	0.72 ±0.16 ^a	1.42 ±0.56 ^{ab}	1.05 ±0.31 ^{ab}
T2: Humus	0.7 ±0.24 ^a	1.33 ±0.29 ^{ab}	1.06 ±0.36 ^{ab}
T3: Bocashi	0.7 ±0.21 ^a	1.07 ±0.27 ^{ab}	0.7 ±0.26 ^a
T4: Suelo + 10 mg L ⁻¹ NPs ZnO	0.56 ±0.25 ^a	0.98 ±0.33 ^{ab}	0.86 ±0.26 ^{ab}
T5: Humus + 10 mg L ⁻¹ NPs ZnO	0.84 ±0.33 ^a	1.52 ±0.73 ^{ab}	1.33 ±0.46 ^b
T6: Bocashi + 10 mg L ⁻¹ NPs ZnO	0.63 ±0.25 ^a	1.07 ±0.29 ^{ab}	0.84 ±0.2 ^{ab}
T7: Suelo + 20 mg L ⁻¹ NPs ZnO	0.69 ±0.29 ^a	1.05 ±0.3 ^{ab}	0.98 ±0.51 ^{ab}
T8: Humus + 20 mg L ⁻¹ NPs ZnO	0.92 ±0.53 ^a	1.56 ±0.79 ^a	1.17 ±0.52 ^{ab}
T9: Bocashi + 20 mg L ⁻¹ NPs ZnO	0.57 ±0.17 ^a	0.85 ±0.38 [#]	0.66 ±0.22 ^b

Medias con letra diferente en las columnas indican diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0.05$). MSR= masa seca de raíz; MSH= masa seca de hojas; MST= masa seca de tubérculo.

En este estudio se evaluaron dosis bajas de nanopartículas en diferentes sustratos, observándose efectos ligeros en el comportamiento morfológico y productivo de las plantas de rábano. Exploraciones futuras podrían analizar concentraciones más elevadas, ya que se ha reportado que la aplicación de hasta 1 000 mg L⁻¹ de nanopartículas de Zn en el cultivo de rábano no inhibe su crecimiento (Samuditha *et al.*, 2024). Las nanopartículas pueden inhibir o estimular las plantas, aunque sus efectos en el crecimiento no siempre son claros (González Moscoso *et al.*, 2022).

Los reportes sobre los efectos negativos de la interacción del sustrato bocashi con NPs ZnO en variables de producción de biomasa son escasos. Por lo anterior, es esencial realizar investigaciones sobre estas interacciones para comprender los mecanismos que ocasionan la fitotoxicidad. Por otro lado, los sustratos orgánicos inmaduros mantienen una alta actividad microbiana y pueden contener compuestos tóxicos que podrían inmovilizar nutrientes esenciales y por lo tanto, perjudicar el crecimiento de las plantas (Giang *et al.*, 2024).

Conclusiones

La aplicación de las dos concentraciones de nanopartículas de óxido de zinc en diferentes sustratos mostró diferencias estadísticas significativas en algunas variables morfología, biomasa y rendimiento del rábano. De manera general, los mejores resultados se presentaron en los tratamientos en que se utilizó como sustrato el humus de lombriz, con 10 y 20 mg L⁻¹ de NPs ZnO. En contraste, los tratamientos con bocashi, con o sin nanopartículas, mostraron los valores más bajos.

Es probable que esta interacción haya provocado un efecto fitotóxico. Los resultados de esta investigación proporcionan una base para el estudio de diferentes dosis de nanopartículas en sustratos orgánicos. Además, futuros estudios deben enfocarse en explorar el mecanismo de interacción conjunta de las nanopartículas de ZnO con los componentes presentes en los abonos orgánicos y las respuestas de los cultivos agrícolas.

Bibliografía

- 1 Ahmed, M.; Marrez, D. A.; Rizk, R.; Zedan, M.; Abdul-Hamid, D.; Decsi, K., Kovács, G. P. and Tóth, Z. 2024. The influence of zinc oxide nanoparticles and salt stress on the morphological and some biochemical characteristics of *Solanum lycopersicum* L. *Plants*. 13(10):1418. <https://doi.org/10.3390/plants13101418>.
- 2 CABI. 2019. *Raphanus sativus* (Radish). CABI digital library. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.1079/cabicompendium.46796#core-ref-5-1>.
- 3 Diacono, M. y Montemurro, F. 2011. Efectos a largo plazo de las enmiendas orgánicas en la fertilidad del suelo. *In*: Lichtfouse, E.; Hamelin, M.; Navarrete, M. and Debaeke, P. Ed. *Agricultura sostenible*, vol. 2. Springer, Dordrecht. 761-786 pp. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-0394-0-34>.
- 4 Feng, W.; Sánchez-Rodríguez, A. R.; Bilyera, N.; Wang, J.; Wang, X.; Han, Y.; Ma, B.; Zhang, H; Li, F.Y.; Zhou, J. and Li, Y. 2024. Mechanisms of biochar-based organic fertilizers enhancing maize yield on a chinese chernozem: root traits, soil quality and soil microorganisms. *Environmental Technology & Innovation*. 36:103756. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103756>.
- 5 Fortis-Hernández, M.; García-Delgado, J. D.; Preciado-Rangel, P.; Trejo-Valencia, R.; Sánchez-estrada, A. and Fortiz-Hernández, J. 2022. Commercial and phytochemical quality in biofortified 'Orejona' lettuce with zinc oxide nanoparticles. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 50(4):12969. <https://doi.org/10.15835/nbha50312969>.
- 6 Fleitas-Díaz, M.; Benítez-Pardillo, T. y Castillo, P. R. 2013. Evaluación de humus de lombriz y estiércol bovino en la producción de rábano (*Raphanus sativus* L.) en condiciones de organopónico. *Revista Científica Pakamuros*. 1(2):18-22. <https://doi.org/10.37787/nvcndj47>.
- 7 Galindo-Guzmán, A. P.; Fortis-Hernández, M.; Rosa-Reta, C. V.; Zermeño-González, H. y Galindo-Guzmán, M. 2022. Síntesis química de nanopartículas de óxido de zinc y su evaluación en plántulas de *Lactuca sativa*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 28(esp):299-308. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3284>.
- 8 Giang, D. D. C.; Dung, T. V.; Dong, N. M.; Phuong, N. M. and Long, V. V. 2024. Effects of organic substrate amendments on selected organic fractions and biochemical parameters under different soils. *Scientifica*. 2024:9997751. <https://doi.org/10.1155/2024/9997751>.
- 9 Garza-Alonso, C. A.; Juárez-Maldonado, A.; González-Morales, S.; Cabrera-Fuente, M.; Cadenas-Pliego, G.; Morales-Díaz, A. B. and Benavides-Mendoza, A. 2023. ZnO nanoparticles as potential fertilizer and biostimulant for lettuce. *Heliyon*. 9(1):e12787. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12787>.

- 10 González-Moscoso, M.; Juárez-Maldonado, A.; Cadenas-Pliego, G.; Meza-Figueroa, D.; SenGupta, B. and Martínez-Villegas, N. 2022. Silicon nanoparticles decrease arsenic translocation and mitigate phytotoxicity in tomato plants. *Environmental Science Pollution Research*. 29:34147-34163. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17665-2>.
- 11 Gui, X.; Rui, M.; Song, Y.; Ma, Y.; Rui, Y.; Zhang, P.; He, X.; Li, Y.; Zhang, Z. and Liu, L. 2017. Phytotoxicity of CeO₂ nanoparticles on radish plant (*Raphanus sativus*). *Environmental Science Pollution Research*. 24:13775-13781. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8880-1>.
- 12 Juárez-Maldonado, A.; Ortega-Ortiz, H.; Morales-Díaz, A. B.; González-Morales, S.; Morelos-Moreno, Á.; Cabrera-Fuente, M.; Sandoval-Rangel, A.; Cadenas-Pliego, G. and Benavides-Mendoza, A. 2019. Nanoparticles and Nanomaterials as Plant Biostimulants. *International Journal Molecular Science*. 20(1):1-19. <https://doi.org/10.3390/ijms20010162>.
- 13 Lata-Álvarez, L. A. y Llerena-Ramos, L. T. 2022. Efecto del humus líquido en variables de crecimiento de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Ciencia Latina. Revista Científica Multidisciplinar*. 6(6):769-778. <https://doi.org/10.37811/cl-rcm.v6i6.3570>.
- 14 Lestari, P. G.; Sinaga, A. O. Y.; Marpaung, D. S. S.; Nurhayu, W. and Oktaviani, I. 2024. Application of organic fertilizer for improving soybean production under acidic stress. *Oil Crop Science*. 9(1):46-52. <https://doi.org/10.1016/j.ocsci.2024.02.001>.
- 15 Liu, L.; Zheng, X.; Wei, X.; Kai, Z. and Xu, Y. 2021. Excessive application of chemical fertilizer and organophosphorus pesticides induced total phosphorus loss from planting causing surface water eutrophication. *Scientific Report*. 11:23015. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02521->.
- 16 Magdaleno-García, G.; Juárez-Maldonado, A.; Betancourt-Galindo, R.; González-Morales, S.; Cabrera-Fuente, M.; Sánchez-Vega, M. y Méndez-López, A. 2023. Morfología de nanopartículas de óxido de zinc modifica la germinación y el crecimiento temprano de plántulas de pimiento morrón. *Biocencia*. 25(3):5-15. <https://doi.org/10.18633/biocencia.v25i3.1908>.
- 17 Mahawar, L.; Živ#ák, M.; Barboricova, M.; Kovár, M.; Fila#ek, A.; Ferencova, J.; Vysoká, D. and Brestí#, 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>.
- 18 Mazhar, Z.; Akhtar, J.; Alhodaib, A.; Naz, T.; Zafar, M. I.; Iqbal, M. M.; Fatima, H. and Naz, I. 2023. Efficacy of ZnO nanoparticles in Zn fortification and partitioning of wheat and rice grains under salt stress. *Scientific Report*. 13:2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26039-8>.
- 19 Mendivil-Lugo, C.; Nava-Pérez, E.; Armenta-Bojórquez, A. D.; Ruelas-Ayala, R. D. and Félix-Herrán, J. A. 2019. Elaboración de un abono orgánico tipo bocashi y su evaluación en la germinación y crecimiento del rábano. *Biocencia*. 22(1):17-23. <https://doi.org/10.18633/biocencia.v22i1.1120>.
- 20 Mielcarz-Skalska, L.; Smoli#ska, B. y W#odarczyk, K. 2021. Nanoparticles as potential improvement for conventional fertilisation in the cultivation of *Raphanus sativus* var. *Sativus*. *Agriculture*. 11(11):1067. <https://doi.org/10.3390/agriculture11111067>.
- 21 Nguyen, N. N.; Nguyen, N. T.; Nguyen, P. T.; Phan, Q. N.; Le, T. L. and Do, H. D. K. 2024. Current and emerging nanotechnology for sustainable development of agriculture: Implementation design strategy and application. *Heliyon*. 10(10):e31503. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31503>.
- 22 Priyanka, N.; Geetha, N.; Ghorbanpour, M. and Venkatachalam, P. 2019. Rol of engineered zinc and copper oxide nanoparticles in promoting plant growth and yield: present status and prospects. *Advances in Phytotechnology*. 183-201 pp. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815322-2.00007-9>.

- 23 Romero-Figueroa, J. C.; Rodríguez-Mendoza, M. N.; Gutiérrez-Castorena, M. C. y Sánchez-Escudero, J. 2013. Vermicompost como sustrato en la producción de menta (*Menta piperita* L.). Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 5(esp):889-899.
- 24 Rehman, H. U.; Aziz, T.; Farooq, M.; Wakeel, A. and Rengel, Z. 2012. Nutrición con zinc en sistemas de producción de arroz: una revisión. Plant Soil. 361:203-226. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1346-9>.
- 25 Samuditha, P. S.; Adassooriya, N. M. and Salim, N. 2024. Assessing phytotoxicity and tolerance levels of ZnO nanoparticles on *Raphanus sativus*: implications for widespread adoptions. Beilstein Journal Nanotechnology. 23(15):115-125. doi:10.3762/bjnano.15.11.
- 26 Sarkhosh, S.; Kahrizi, D.; Darvishi, E.; Tourang, M.; Haghghi-Mood, S.; Vahedi, P. and Ercisli, S. 2022. Effect of zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs) on seed germination characteristics in two Brassicaceae family species: *Camelina sativa* and *Brassica napus* L. Journal of Nanomaterials. 2022:1892759. <https://doi.org/10.1155/2022/1892759>.
- 27 Saritha, N. G.; Anju, T. and Kumar, A. 2022. Nanotechnology Big impact: how nanotechnology is changing the future of agriculture? Journal of Agriculture and Food Research. 10:100457. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100457>.
- 28 Semenova, N. A.; Burmistrov, D. E.; Shumeyko, S. A. and Gudkov, S. V. 2024. Fertilizers based on nanoparticles as sources of macro and microelements for plant crop growth: a review. Agronomy. 14(8):1646. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081646>.
- 29 Singh, A.; Rajput, V. D.; Varshney, A.; Ghazaryan, K. and Minkina, T. 2023. Small Tech, Big Impact: agri-nanotechnology journey to optimize crop protection and production for sustainable agriculture. Plant Stress. 10:100253. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100253>.
- 30 Toledo-Manuel, I.; Pérez-Álvarez, M.; Cadenas-Pliego, G.; Cabello-Alvarado, C. J.; Ledezma-Pérez, A. S.; Mata-Padilla, J. M.; Andrade-Guel, M. and Alvarado-Canché, C. N. 2024. Functionalization methods for ZnO nanoparticles with citric acid and their effect on antimicrobial activity. Ceramics International. 50(21):42195-42206. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.08.063>.
- 31 Yang, S.; Yin, R.; Wang, C.; Yang, Y. and Wang, J. 2023. Phytotoxicity of zinc oxide nanoparticles and multi-walled carbon nanotubes alone or in combination in *Arabidopsis thaliana* and their mutual effects on oxidative homeostasis. PLoS ONE. 18(2):e0281756. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281756>.
- 32 Zhang, J.; He, P.; Ding, W.; Xu, X.; Ullah, S.; Abbas, T.; Ai, C.; Li, M.; Cui, R.; Jin, C. and Zhou, W. 2019. Estimating nutrient uptake requirements for radish in China based on QUEFTS model. Scientific Report. 9:11663. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48149-6>.



Efecto de nanopartículas de óxido de zinc sobre el desarrollo del rábano en sustratos orgánicos

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 00 January 2025
Date accepted: 00 April 2025
Publication date: 15 October 2025
Publication date: Sep-Oct 2025
Volume: 16
Issue: esp30
Electronic Location Identifier: e4038
DOI: 10.29312/remexca.v16i30.4038
Article Id (other): 00001

Categories

Subject: Artículos

Palabras clave

Palabras clave

Raphanus sativus L.
nanomateriales
óxido de zinc
sustratos orgánicos

Counts

Figures: 0

Tables: 5

Equations: 0

References: 32