Ensayo de investigación

Impacto de nanomateriales de Zn en parámetros agronómicos y fisiológicos en plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris*)

Impact of Zn nanomaterials on agronomic and physiological parameters in bean plants (*Phaseolus vulgaris*)

Jorge Rodríguez-Noriega[1], Josué Israel García-López[1]*, Norma Angélica Ruiz-Torres[1], Neymar Camposeco-Montejo[1], Perpetuo Álvarez-Vázquez[2], Xóchitl Ruelas-Chacón[3]

[1]Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas, Departamento de Fitomejoramiento
[2]Departamento de Recursos Naturales Renovables
[1]Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos
[1,2,3]Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

*Autor de correspondencia:
g.lopezj90@gmail.com
josue.garcia@uaaan.edu.mx

Recibido: 17-10-2025 Aceptado: 16-06-2026 (Artículo Arbitrado)

Resumen

En la última década, el uso de nanomateriales de zinc (Zn) en prácticas agrícolas como nanofertilizantes y nanoplaguicidas, ha ganado interés por parte de los involucrados en los sistemas de producción agrícola. Por esta razón, es necesario realizar estudios para comprender sobre los efectos que generan las nanopartículas de óxido de Zn (NPs ZnO) en cultivos de interés agrícola. Este estudio se desarrolló específicamente para medir los efectos comparativos de las nanopartículas metálicas de Zn (NPs ZnO), sulfato de Zn ($ZnSO_4 \cdot H_2O$) y nanopartículas verdes de óxido de Zn (GNPs ZnO) en diferentes concentraciones (25, 50, 75 y 100 mg de Zn/kg de suelo) sobre parámetros fisiológicos y agronómicos en plantas de frijol. Los resultados indican que todos los compuestos de Zn aplicados mejoran el desarrollo de área foliar y el rendimiento de vaina y grano en las plantas de frijol. Además, los mejores resultados para el área foliar y rendimiento de vaina se obtuvieron con la fuente GNPs ZnO a 75 mg de Zn kg^{-1} de suelo. Para la concentración de clorofila y nitrógeno no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos.

Palabras clave: *Phaseolus vulgaris*, nanomateriales, rendimiento, fisiología, Zn.

Abstract

Over the last decade, the use of zinc (Zn) nanomaterials in agricultural practices such as nanofertilizers and nanopesticides has gained interest among those involved in agricultural production systems. For this reason, studies are needed to understand the effects of zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) on crops of agricultural interest. This study was specifically designed to measure the comparative effects of metallic zinc nanoparticles (ZnO NPs), Zn sulfate ($ZnSO_4 \cdot H_2O$), and green Zn oxide nanoparticles (ZnO GNPs) at different concentrations (25, 50, 75, and 100 mg Zn/kg soil) on physiological and agronomic parameters in bean plants. The results indicate that all Zn compounds applied improve leaf area development and pod and grain yield in bean plants. In addition, the best results for leaf area and pod yield were obtained with the ZnO GNPs source at 75 mg Zn kg^{-1} of soil. No significant differences were found between treatments for chlorophyll and nitrogen concentration.

Keywords: *Phaseolus vulgaris*, nanomaterials, yield, physiology, Zn.

Introducción

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es una de las leguminosas alimenticias más importantes a nivel mundial, ya que se consume de diversas formas como sopas, guisos, ensaladas y como acompañamiento de platos principales (Asrat y Abera, 2025). El frijol es muy importante en las dietas tradicionales, con niveles de consumo que van desde los 10 hasta los 110 kg per cápita anuales. En México, el consumo de frijol ronda los 11 kg por persona al año (Ramírez-Jaspeado et., 2020). La importancia del frijol a nivel nutricional se debe a que los granos contienen una alta proporción de hidratos de carbono solubles (35-70 %), bajo contenido en grasas (1-2 %), alto porcentaje de proteínas (20 %), fibra (5-10 %) y minerales (3 %), como el calcio y hierro (Cid-Gallegos et al., 2023).

Sin embargo, a pesar de la gran importancia que tiene este cultivo en México, la producción de frijol grano es deficitaria, con importaciones que superan el 11 % del consumo total. La principal problemática para el abastecimiento de frijol se debe a que más del 70 % de la producción de frijol se genera por pequeños y medianos productores (cultivan entre 1 a 15 ha), lo que genera que los sistemas de producción sean poco tecnificados y la mayor parte de la superficie (86 %) se siembra con agricultura de temporal, dónde la mayor condicionante es el recurso hídrico (SIAP, 2022; Espinosa-Rodríguez et al., 2025).

Bajo este contexto, es necesario gestionar prácticas agronómicas que mejoren los sistemas tradicionales de producción agrícola, a fin de mejorar los rendimientos de los cultivos y abastecer las deficiencias de alimentos a nivel nacional. Dentro de las prácticas agrícolas, una fertilización adecuada de micronutrientes como el Zn puede contribuir al incremento del rendimiento y mejorar la calidad de las partes comestibles de las plantas (Stanton et al., 2022). Ya que, dentro de los sistemas biológicos, el Zn juega un papel importante en procesos como la síntesis de proteínas, y el ADN, además ayuda al sistema inmunológico a combatir bacterias y virus. Pero además interviene en procesos fisiológicos que se llevan a cabo en las plantas como la fotosíntesis, síntesis proteica y de fitohormonas, integridad de las membranas celulares, vigor de la plántula, formación de azúcares y defensas contra factores de estrés abióticos, como sequías y enfermedades; por lo tanto, la deficiencia de Zn en los cultivos reduce tanto su valor nutrimental como el rendimiento (Akhondi et al., 2025).

Considerada como una tecnología emergente, la nanotecnología a través del uso de nanopartículas (1-100 nm) aplicadas como nanofertilizantes en cultivos, permite una mejor absorción y asimilación de nutrientes específicos como el Zn, esto en comparación con la fertilización común ya que el suministro de nutrientes se da en forma gradual y controlada con el fin de incrementar el contenido de minerales de manera puntual (García-López et al., 2019). En este contexto, dentro de los métodos agronómicos para mejorar el rendimiento de los cultivos, la fertilización con el uso de nanomateriales es un método viable para mejorar el rendimiento de los cultivos. Por lo anterior, este estudio planteó evaluar el impacto de diferentes fuentes de Zn a concentraciones de 0, 25, 50, 75 y 100 mg de Zn/kg de suelo sobre las respuestas fisiológicas y agronómicas del cultivo de frijol.

Materiales y métodos

Materiales de Zn

Las nanopartículas de óxido de Zn comerciales (NPs ZnO, polvo <100 nm) y el sulfato de Zn ($ZnSO_4 \cdot H_2O$) fueron obtenidos de Sigma-Aldrich® y utilizados como fueron recibidos, las nanopartículas de óxido de Zn fueron sintetizadas mediante síntesis verde (GNPs ZnO) siguiendo la metodología establecida por Naiel et al., (2022).

Caracterización de las NPs ZnO y GNPs ZnO

La determinación de la estructura cristalina de las GNPs ZnO se llevó a cabo mediante difracción de rayos X usando un bruker D8 Advance con radiación (40 Kv, 44 mA) en un rango de medición de 10-80 ° (grados theta) en escala 2Θ con una velocidad de paso de 0.02 grados por segundo. La morfología y el tamaño de partícula fueron estudiados usando un microscopio electrónico de trasmisión de alta resolución modelo FEI Titan 80-300.

Establecimiento y manejo del cultivo

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo durante el ciclo agrícola invierno-primavera 2025 en el quinto invernadero de tipo túnel, del campo experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), ubicado en Saltillo Coahuila, a una latitud de 25°21’19.5” N, una longitud de101°01’49.7” W y una altitud de 1,731 msnm. Este invernadero cuenta con una infraestructura de mediana tecnología. Además de condiciones ambientales que oscilaron entre 25-28 °C de temperatura y 65-75 % de humedad relativa. El material genético usado para esta investigación fue frijol pinto Saltillo, desarrollada por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

Con respecto al cultivo de frijol, inicialmente se prepararon las macetas de poliestireno con 750 g de materia orgánica (peat moss), las cuales fueron tratadas con las tres diferentes fuentes de Zn, mencionadas anteriormente. Después se sembraron dos semillas en cada maceta, las cuales se regaron cada 48 h, usando 400 mL de solución nutritiva (sin Zn),

preparada con agua y una formulación comercial de macronutrientes (FertiDrip ® N17-P17-K17), con un pH de 6.47 y conductividad eléctrica de 0.41 μS cm^{-1}. El ciclo del cultivo tuvo una duración de 92 días.

Aplicación de tratamientos

La aplicación de los tratamientos se llevó a cabo directamente en el suelo, usando una técnica manual para formar una mezcla del suelo y los diferentes compuestos. En la Tabla 1 se muestran las cantidades utilizadas de $ZnSO_4$, NPs ZnO y GNPs ZnO por cada kilogramo de suelo, con la finalidad de preparar los sustratos con diferentes concentraciones de Zn (25, 50, 75 y 100 mg de Zn/kg de suelo).

Variables evaluadas

Algunos de los datos fueron obtenidos durante la etapa de madures fisiológica. El resto de ellos se obtuvieron en el laboratorio de granos y semillas a partir de los granos cosechados. Las variables que fueron evaluadas se describen con mayor detalle a continuación:

- **Contenido de clorofila:** Se midió utilizando un medidor portátil Yieryi (modelo MQ-YLS), expresado en valores para el desarrollo de análisis de suelos y plantas (SPAD).
- **Contenido de nitrógeno:** Se determinó también con el medidor portátil Yieryi (MQ-YLS) y se expresó en miligramos por gramo (mg/g).
- **Área foliar:** Se evaluó mediante un medidor de área LI-3100C (LICOR Biosciences, Lincoln, NE, EE. UU.).
- **Rendimiento:** Se determinó mediante el pesaje individual de cada planta utilizando una balanza analítica OHAUS (modelo EP613). Posteriormente, los datos obtenidos se ajustaron para expresar el rendimiento en kg por hectárea (kg ha^{-1}), considerando una densidad de siembra de surcos separados a 70 cm y una distancia entre plantas de 15 cm.

Diseño experimental

El desarrollo del proyecto se estableció bajo un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial, considerando las fuentes de fertilización como factor A (NPs ZnO, GNPs ZnO y $ZnSO_4$), y factor B las concentraciones (25, 50, 75 y 100 mg de Zn/kg de suelo), cada tratamiento tuvo cuatro repeticiones, considerando cuatro macetas como tratamiento control, para un total de 52 macetas experimentales.

Análisis estadístico

El análisis de los datos se realizó mediante análisis de varianza (ANOVA) y prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$). Se utilizó el paquete estadístico SPSS versión 21.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

Modelo estadístico

En este estudio utilizamos un diseño completamente al azar con arreglo factorial. Los experimentos factoriales se utilizan para evaluar el efecto conjunto de dos o más factores. Por ejemplo, en este estudio evaluamos el efecto los tratamientos con Zn (factor *A*) y las concentraciones utilizadas (factor *B*). Cuando se evalúan dos o más factores en forma conjunta, es posible estimar la interacción entre ellos (*A*B*). En este caso, el ensayo se estableció en condiciones homogéneas (invernadero), con el fin de evaluar la interacción de los factores "fuente de Zn y concentraciones". En el modelo matemático (fórmula (1)) se puede observar que y_{ij} representa las variables de respuesta (contenido de clorofila y nitrógeno, área foliar y rendimiento), las cuales dependen de los factores en estudio; *Ai* efecto del tratamiento y *Bi* efecto de la concentración, además de la interacción *A*B* tratamiento*concentración. (ver la fórmula (1)).

$$y_{ijkl} = \mu + A_{jf} + B_{jk} + (A * B) + \varepsilon_{ijkl} \qquad (1)$$

Tabla 1. Cantidades de $ZnSO_4$, NPs ZnO y GNPs ZnO utilizadas para la preparación de sustratos a las diferentes concentraciones de Zn.

Concentración de Zn mg/kg de suelo	$ZnSO_4$ (mg)	NPs ZnO/GNPs ZnO (mg)
25	46.2963	23.338275
50	92.5926	46.676625
75	138.8889	70.0149
100	185.1852	93.35325

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

y_{ij} = observación de la unidad experimental.

μ = media general de la variable observada.

Ai = efecto de tratamiento (NPs ZnO, GNPs ZnO, $ZnSO_4$).

Bi = efecto de concentraciones (0, 25, 50, 75, 100).

*A*B* = efecto de la interacción *A*B* (tratamiento-concentración)

ε_{ij} = error experimental.

Resultados y discusión

Caracterización de las GNPs ZnO y NPs ZnO

La pureza de las nanopartículas fue determinada mediante espectrometría de rayos X de energía dispersiva (EDX). Los espectros de ambas nanopartículas muestran picos intensos pertenecientes al Zn y O, los cuales se observan en la Figura 1. El porcentaje de masa en GNPs ZnO fue de Zn (79.93 %) y O (20.06 %). Las NPs ZnO tienen un porcentaje de Zn y O 82.8 % y 17.18 %, respectivamente. De acuerdo al peso molecular de cada elemento, el porcentaje teórico esperado para Zn y O es de 80.3% y 19.7%. Estos resultados confirman que ambos nanomateriales poseen alta pureza.

La morfología y tamaño de las nanoparticulas fue determinada mediante imágenes de alta resolución obtenidas mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM). En la micrografía de la izquierda se observan las GNPs ZnO, las cuales poseen una morfología esférica con un tamaño promedio de 70 nm (Figura 2a). Mientras que en micrografía de la derecha se observan las NPs ZnO, las cuales tienen una morfología heterogénea, en la cual se destacan partículas esféricas y bastones con un tamaño promedio de partícula de 41 nm (Figura 2b).

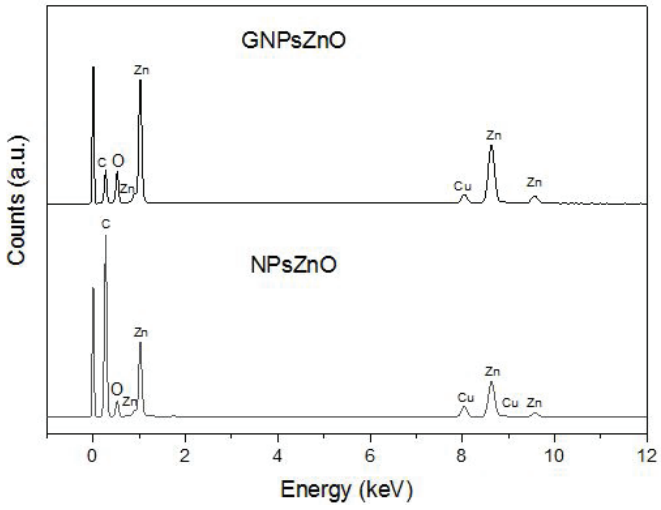


Figura 1. Análisis EDX de GNPs ZnO y NPs ZnO.
Fuente: Elaboración propia.

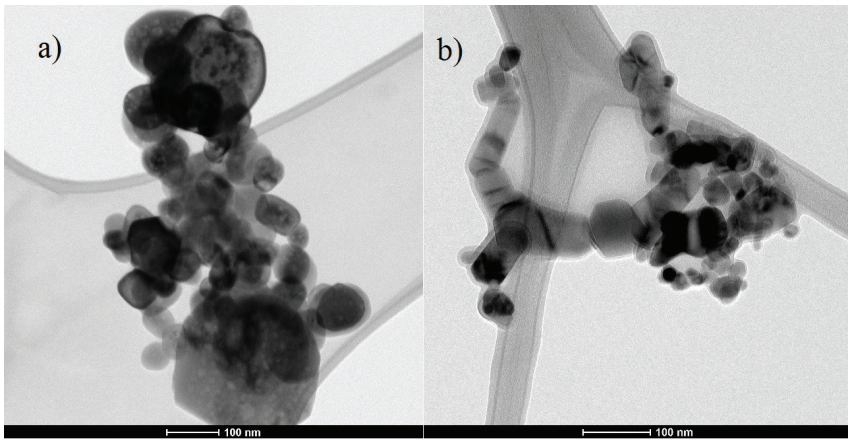


Figura 2. Micrografías obtenidas mediante TEM de a) GNPs ZnO y b) NPs ZnO.
Fuente: Elaboración propia.

Contenido de clorofila y nitrógeno

En la Figura 3, se presenta la interacción de los tratamientos con las diferentes concentraciones aplicadas a plantas de frijol, los valores SPAD de clorofila en las hojas de frijol obtenidos en todos los tratamientos se mantuvieron en un rango entre aproximadamente 40 y 45 unidades (Figura 3A), incluyendo el testigo, sin embargo, no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos. Para el caso del nitrógeno, los valores van de 13 a 15 mg/g (Figura 3B), pero tampoco se detectan diferencias significativas.

Área foliar y peso en vaina

En la Figura 4, se puede observar que en el área foliar (Figura 4A), el mayor valor se registró con el tratamiento GNPs ZnO a una concentración de 75 mg de Zn/kg de suelo, alcanzando los 326.62 cm^2. En contraste, el valor más bajo correspondió a $ZnSO_4$ a 25 mg de Zn/kg de suelo, con un área foliar de 235.49 cm^2. El testigo mostró un valor intermedio de 246.24 cm^2. Respecto al peso en vaina (Figura 4B), los tratamientos con Zn también presentaron valores promedio más altos que el testigo, el cual tuvo un peso aproximado de 2.04 g. El mayor peso promedio se registró en el tratamiento con NPs ZnO a 75 mg de Zn/kg de suelo, con un valor de 2.6 g. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Gupta et al. (2024), quienes investigaron el efecto de NPs ZnO en plantas de frijol bajo condiciones de estrés por salinidad. En su estudio la aplicación de NPs ZnO ya sea por vía foliar y/o aplicación al suelo promovió mejoras notables en el peso fresco (hasta un 83 %) y peso seco (hasta un 92 %) en comparación con plantas estresadas.

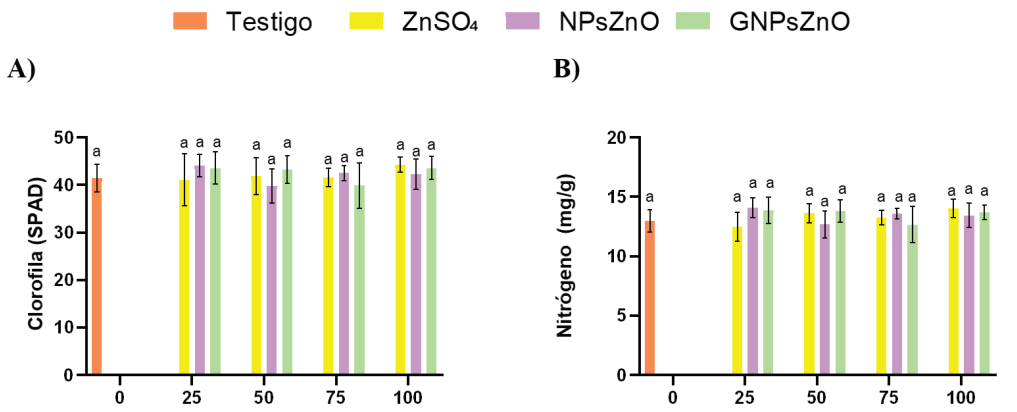


Figura 3. Clorofila (A) y nitrógeno (B) sometidos a diferentes tratamientos de Zn con concentraciones de 0 a 100 mg de Zn/kg de suelo. Los valores son el promedio de las cuatro repeticiones (n=4). Las barras representan la desviación estándar de la media. Letras diferentes en cada barra significa que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). **Fuente:** Elaboración propia.

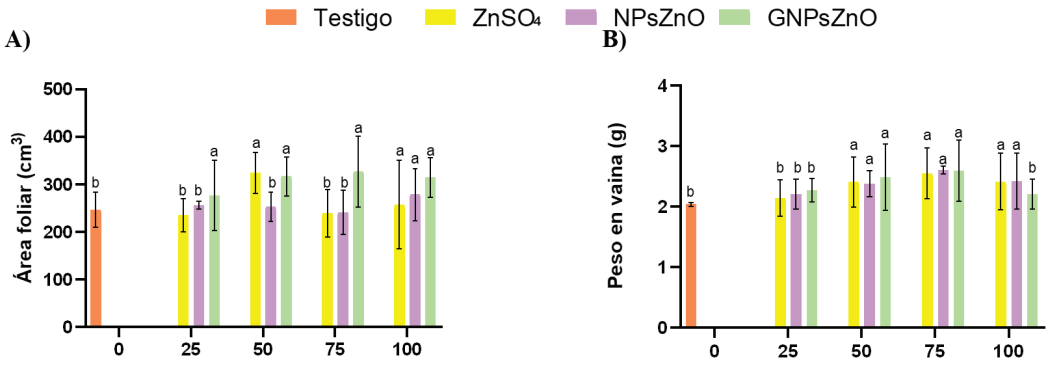


Figura 4. Área foliar (A) y peso de vaina (B) sometidos a diferentes tratamientos de Zn con concentraciones de 0 a 100 mg de Zn/kg de suelo. Los valores son el promedio de las cuatro repeticiones (n=4). Las barras representan la desviación estándar de la media. Letras diferentes en cada barra significa que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).
Fuente: Elaboración propia.

Rendimiento de grano y de vaina

En el caso del rendimiento en grano de frijol (Figura 5A), los mejores valores se obtuvieron con el tratamiento GNPs ZnO a una concentración de 75 mg de Zn/kg de suelo con 502 kg/ha superado al testigo que obtuvo 330 kg/ha (corresponde a un incremento del 34.2 %), lo que sugiere que este tipo de fertilización podría mejorar la eficiencia de absorción y aprovechamiento del Zn. Respecto al rendimiento en vaina (Figura 5B), el tratamiento más destacado fue el de NPs ZnO a una concentración de 75 mg de Zn/kg de suelo, con un valor de 2471 kg/ha, también superior al testigo que registró 1934 kg/ha (corresponde a un incremento del 21.7 %). Al igual que en el caso anterior, estos datos podrían atribuirse a una mejor disponibilidad y asimilación del Zn.

En resumen, los resultados indican que la aplicación de nanomateriales de Zn en plantas de frijol puede estimular el desarrollo de área foliar e incrementar la productividad de la vaina y el grano. Las mejoras en el rendimiento de las plantas se deben, a que el Zn es un micronutriente esencial para el desarrollo de las plantas, incluso en pequeñas cantidades, ya que tiene un papel activo en procesos y reacciones biofísico-químicos de las plantas como la activación de genes, síntesis de proteínas y carbohidratos (García-Reyes et al., 2024). Además, el Zn es un componente estructural de más de 300 enzimas, por lo que es considerado como una metaloproteina al formar parte integral de enzimas antioxidantes (Natasha et al., 2022).

Algunos estudios han determinado el efecto de nanomateriales a base de Zn en diversos cultivos. Por ejemplo, un estudio realizado por Rossi et al. (2018) demostró que la aplicación foliar de NPs ZnO influyó positivamente en el crecimiento y la fisiología de plantas de café (*Coffea arabica* L.), con efectos más favorables que las sales de Zn ($ZnSO_4$), principalmente debido a su mayor capacidad para penetrar en la hoja. Otra investigación realizada en arboles de granada (*Punica granatum* cv. Ardestani) mostró que la fertilización foliar con cantidades relativamente bajas de nanofertilizantes de Zn y boro (B) incrementó el rendimiento y la calidad de los frutos, incluyendo aumentos en los azucares del jugo e incrementos en el índice de madurez (Davarpanah et al., 2016).

Conclusiones

Los resultados de este estudio, permiten verificar que las aplicaciones de compuestos de Zn en el suelo permiten mejorar el desarrollo de área foliar, el rendimiento de vaina y grano en las plantas de frijol. Sin embargo, para la fuente de variación tipo de fertilizante, no se presenta un comportamiento homogéneo en cuanto a las respuestas agronómicas del cultivo. Para la interacción, los mejores resultados en cuanto al desarrollo de área foliar y rendimiento de vaina y grano se presentaron con la fuente GNPs ZnO a 75 mg de Zn kg^{-1} de suelo.

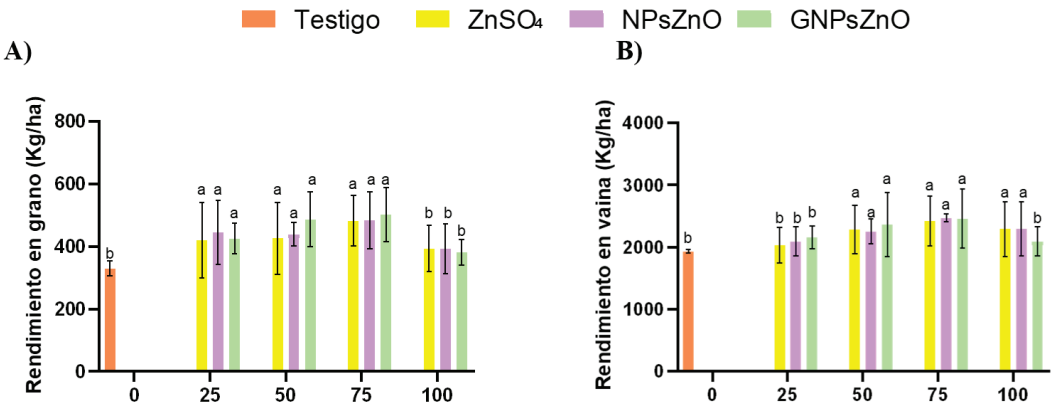


Figura 5. Rendimiento en kilogramos por hectárea en grano (A) y vaina (B) de plantas de frijol sometidos a diferentes tratamientos de Zn con concentraciones 0 a 100 mg de Zn/kg de suelo. Los valores son el promedio de las cuatro repeticiones (n=4). Las barras representan la desviación estándar de la media. Letras diferentes en cada barra significa que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). **Fuente:** Elaboración propia.

Referencias

Akhondi, M., Amiri, M. S., Beyk-Khormizi, A., Mousavi-Kouhi, S. M., Gautam, R. K., Mottaghipisheh, J., and Yazdi, M. E. T. (2025). Zinc oxide nanoparticles as a way to improve physiology, photosynthesis, and anti-oxidative systems in Salvia leriifolia. *Plant Nano Biology*, 100211.

Asrat, U., and Abera, D. (2025). Production and overall importance of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Ethiopia. *Cogent Food & Agriculture*. 11:(1), 2548619.

Cid-Gallegos, M. S., de las Mercedes Gómez, Y., Corzo-Ríos, L. J. C. R., Sanchez-Chino, X. M., Moguel-Concha, D., Borges-Martínez, E., y Jiménez-Martínez, C. (2023). Potencial nutricional y bioactivo de frijol (*Phaseolus vulgaris*) en la salud humana. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*. 8(1): 309-318.

Davarpanah, S., Tehranifar, A., Davarynejad, G., Abadía, J., and Khorasani, R. (2016). Effects of foliar applications of zinc and boron nano-fertilizers on pomegranate (*Punica granatum* cv. Ardestani) fruit yield and quality. *Scientia Horticulturae*, 210, 57-64.

Espinosa-Rodríguez, M., Sabino-López, J. E., Antúnez-Ocampo, O. M., Pérez-Pacheco, R., and Maldonado-Peralta, M. D. L. Á. (2025). Socioeconomic and productive characterization of native bean producers in Guerrero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 16(2).

García-López, J. I., Niño-Medina, G., Olivares-Sáenz, E., Lira-Saldivar, R. H., Barriga-Castro, E. D., Vázquez-Alvarado, R., and Zavala-García, F. (2019). Foliar application of zinc oxide nanoparticles and zinc sulfate boosts the content of bioactive compounds in habanero peppers. *Plants*. 8(8): 254.

García-Reyes, E., García-López, J. I., Ramírez-Barrón, S. N., Flores-Naveda, A., Álvarez-Vázquez, P., Hernández-Juárez, A., and Barriga-Castro, E. D. (2024). Calcareous soil modified with metallic and organic ZnO nanoparticles limits photosynthetic pigment accumulation and macronutrient uptake in Swiss chard (*Beta vulgaris* var. cicla). *Plant Nano Biology*. 10, 100108.

Gupta, A., Bharati, R., Kubes, J., Popelkova, D., Praus, L., Yang, X., and Brestic, M. (2024). Zinc oxide nanoparticles application alleviates salinity stress by modulating plant growth, biochemical attributes and nutrient homeostasis in *Phaseolus vulgaris* L. *Frontiers in Plant Science*. 15, 1432258.

Naiel, B., Fawzy, M., Halmy, M. W. A., and Mahmoud, A. E. D. (2022). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using Sea Lavender (*Limonium pruinosum* L. Chaz.) extract: characterization, evaluation of anti-skin cancer, antimicrobial and antioxidant potentials. *Scientific Reports*, 12(1): 20370.

Natasha, N., Shahid, M., Bibi, I., Iqbal, J., Khalid, S., Murtaza, B., and Arshad, M. (2022). Zinc in soil-plant-human system: A data-analysis review. *Science of the Total Environment*. 808, 152024.

Ramírez-Jaspeado, R., Palacios-Rojas, N., Nutti, M., y Pérez, S. (2020). Estados potenciales en México para la producción y consumo de frijol biofortificado con hierro y zinc. *Revista fitotecnia mexicana*. 43(1): 11-23.

Rossi, L., Fedenia, L. N., Sharifan, H., Ma, X., and Lombardini, L. (2019). Effects of foliar application of zinc sulfate and zinc nanoparticles in coffee (*Coffea arabica* L.) plants. *Plant Physiology and Biochemistry*. 135, 160-166.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SIAP. (2022). Anuario estadístico de la producción agrícola. https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/.

Stanton, C., Sanders, D., Krämer, U., and Podar, D. (2022). Zinc in plants: Integrating homeostasis and biofortification. *Molecular Plant*. 15(1): 65-85.