

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



EFFECTO DE NANOPARTÍCULAS DE ZnO EN LA PRODUCTIVIDAD,
BIOFORTIFICACIÓN DE Zn Y CALIDAD NUTRICIONAL DE FRIJOL

Tesis

Que presenta JORGE RODRÍGUEZ NORIEGA
como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN TECNOLOGÍA DE GRANOS Y SEMILLAS

EFFECTO DE NANOPARTÍCULAS DE ZnO EN LA PRODUCTIVIDAD, BIOFORTIFICACIÓN DE Zn Y CALIDAD NUTRICIONAL DE FRIJOL

Tesis

Elaborado por JORGE RODRÍGUEZ NORIEGA como requisito parcial para obtener el
Grado de Maestro en Tecnología de Granos y Semillas con la supervisión y aprobación
del Comité de Asesoría.

Dr. Josué Israel García López
Director de Tesis

Dra. Norma Angélica Ruíz Torres
Asesor

Dr. Neymar Camposeco Montejó
Asesor

Dr. Perpetuo Álvarez Vázquez
Asesor

Dra. Kochiti Ruelas Chacón
Asesor

Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de Postgrado
UAAAN

AGRADECIMIENTOS

A **mi Alma Terra Mater** la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por darme la oportunidad de formarme como profesionista en esta gran casa de estudios.

A mis padres, **Marcelina Noriega Dimas** y **Jorge Rodríguez Rivera**, por ser mi pilar, por creer en mí y ayudarme a llegar a donde estoy; les agradezco su apoyo incondicional, su amor y su cariño en cada etapa de mi vida. A mis hermanas, **Teresa, Sanjuana** y **María Herlinda**, por brindarme su apoyo y compañía constante.

Agradezco también al **Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas** de la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (CCDTS)** por brindarme los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación y por aceptarme en el programa de maestría.

Mi profundo agradecimiento al **Dr. Josué García López**, director de esta tesis, por su **guía constante, su valiosa orientación y su inagotable paciencia**. Su experiencia y dedicación han sido cruciales para la culminación de este proyecto.

A mis asesores a **Dra. Norma Ruiz Torres**, la **Dra. Xóchitl Ruelas Chacón**, el **Dr. Neymar Camposeco Montejo** y el **Dr. Perpetuo Álvarez Vázquez**, por sus contribuciones, sugerencias y apoyo permanente.

A la **Dra. Adriana Morfín-Gutiérrez** por el tiempo dedicado y su valiosa colaboración.

Finalmente, agradezco a la **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)**, por la beca otorgada que hizo posible la realización de mis estudios de maestría.

DEDICATORIA

A Dios, por darme la oportunidad de cerrar esta etapa con este proyecto.

A mis papás y a mis hermanas, por su apoyo incondicional en todo momento.

A mis profesores por guiarme durante todo este trayecto.

A todas las personas involucradas en mi vida que me han inspirado, confían en mí y aportan vibra positiva.

Y a mi Alma Terra Mater la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por darme la oportunidad de culminar mi carrera universitaria.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	iii
DEDICATORIA	iv
RESUMEN	ix
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1
HIPÓTESIS Y OBJETIVO	3
Hipótesis alterna.....	3
Hipótesis nula.....	3
Objetivo general	3
REVISIÓN DE LITERATURA	4
Generalidades del frijol.....	4
Generalidades del Zn.....	5
Importancia del Zn	6
Deficiencias de Zn.....	7
Biofortificación y el uso nanopartículas	8
MATERIALES Y MÉTODOS	10
Sitio experimental y material genético.....	10
Materiales.....	10
Síntesis y caracterización de GNPsZnO	10
Manejo del cultivo	10
Variables evaluadas.....	11
Diseño experimental	11
Aplicación de tratamientos.....	11

Análisis estadístico.....	12
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	13
Efecto de diferentes fuentes de Zn en parámetros agronómicos.....	13
Comportamiento agronómico por tipo de fertilizante.....	13
Comportamiento agronómico por la concentración aplicada	16
Interacción entre el tipo de fertilizante y concentración de Zn.....	18
Área foliar y peso en vaina.....	18
Rendimiento de grano y en vaina.....	19
CONCLUSIONES.....	21
REFERENCIAS	22

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Cantidades de $ZnSO_4$, $NPsZnO$ y $GNPsZnO$ utilizadas para la preparación de sustratos a las diferentes concentraciones de Zn.....	12
Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza para parámetros agronómicos sometidas a diferentes compuestos de Zn.	14
Cuadro 3. Comparación de medias por el tipo de fertilizante para parámetros agronómicos sometidas a diferentes compuestos de Zn.	15
Cuadro 4. Comparación de medias por el nivel de concentración para parámetros agronómicos sometidas a diferentes compuestos de Zn.	17

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área foliar (A) y peso en 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, $P \leq 0.05$).....	19
Figura 2. Rendimiento en grano (A) y en vaina (B) 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, $P \leq 0.05$).....	20

RESUMEN

EFFECTO DE NANOPARTÍCULAS DE ZnO EN LA PRODUCTIVIDAD,
BIOFORTIFICACIÓN DE Zn Y CALIDAD NUTRICIONAL DE FRIJOL

Por

JORGE RODRÍGUEZ NORIEGA
MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA DE GRANOS Y SEMILLAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DR. JOSUÉ ISRAEL GARCÍA LÓPEZ- ASESOR-

El objetivo del trabajo de investigación fue determinar el impacto de diferentes fuentes de Zn sobre las respuestas agronómicas y fisiológicas en el cultivo de frijol. Los nanomateriales utilizados fueron nanopartículas cerámicas de Zn (NPs ZnO), nanopartículas de Zn de síntesis verde (GNPs ZnO) y sulfato de Zn (ZnSO₄), las concentraciones aplicadas fueron 25, 50, 75 y 100 mg de Zn/kg de suelo, además de un control. El experimento se estableció en condiciones de agricultura protegida, en un invernadero perteneciente al Departamento de Fitomejoramiento de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN). Según los resultados obtenidos, la fuente de variación tratamiento (tipo de fertilizante de Zn), afectó significativamente las variables altura, diámetro y rendimiento de grano. Mientras que la fuente de variación concentración modificó la altura de planta, el peso de vaina y el rendimiento de grano. En cuanto a la interacción, se registró un efecto significativo para el peso de vaina, área foliar, rendimiento de vaina y de grano. Con los resultados de este estudio, se pueden verificar el impacto que generan diferentes fuentes de Zn (Zn) en una de las leguminosas de mayor importancia a nivel nacional.

Palabras clave: *Phaseolus vulgaris*, nanomateriales, biofortificación, fisiología, respuestas agronómicas, Zn.

ABSTRACT

EFFECT OF ZnO NANOPARTICLES ON YIELD, Zn BIOFORTIFICATION, AND
NUTRITIONAL QUALITY OF BEANS

BY

JORGE RODRÍGUEZ NORIEGA
MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA DE GRANOS Y SEMILLAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DR. JOSUÉ ISRAEL GARCÍA LÓPEZ- ADVISOR-

Saltillo, Coahuila

November, 2025

The objective of the research was to determine the impact of various sources of Zn on agronomic and physiological responses in bean cultivation. The nanomaterials used were Zn ceramic nanoparticles (ZnO NPs), green synthesis Zn nanoparticles (GZnO NPs), and Zn sulfate (ZnSO₄). The concentrations applied were 25, 50, 75, and 100 mg Zn/kg of soil, in addition to a control. The experiment was conducted under protected agriculture conditions in a greenhouse belonging to the Plant Breeding Department of the Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN). According to the results obtained, the source of variation treatment (type of Zn fertilizer) significantly affected plant height, diameter, and grain yield. Meanwhile, the source of variation concentration modified plant height, pod weight, and grain yield. In terms of interaction, significant effects were recorded for pod weight, leaf area, pod yield, and grain yield. The results of this study confirm the impact of different sources of Zn (Zn) on one of the most important legumes at the national level.

Palabras clave: *Phaseolus vulgaris*, nanomaterials, biofortification, physiology, agronomic responses, Zn.

INTRODUCCIÓN

Actualmente alrededor de la tercera parte de la población mundial se ve afectada por carencias de micronutrientes (Fonseca *et al.*, 2022). Las deficiencias de Zn y Fe en la salud humana se manifiestan con retraso en el crecimiento, falta de apetito, dermatitis, alopecia, deterioro de la función inmunológica que puede provocar diarrea frecuente y/o infección del tracto respiratorio superior, entre otras enfermedades (Álvarez-Ariza *et al.*, 2019). Por esto, se puede convertir en un problema de salud social. Lamentablemente, en los países en vías de desarrollo que basan su alimentación en el consumo de cereales básicos (arroz, frijol, maíz, trigo y sorgo), la ingesta de micronutrientes como el Zn y el Fe se ve limitada, debido a la baja concentración de estos nutrientes en los granos (Kihara *et al.*, 2024)

En atención a este problema, las investigaciones en agronomía han enfocado sus esfuerzos a la mejora en la concentración de microelementos esenciales para la salud humana en tejidos comestibles de las plantas a través de la mejora genética y la biofortificación, que se define como el proceso que contribuye al aumento de nutrientes esenciales como el Zn y el Fe biodisponibles en las partes comestibles de las plantas (Sainz, 2019). Dentro de las prácticas agrícolas, una fertilización adecuada puede contribuir al incremento de la concentración de micronutrientes en las partes comestibles de las plantas y con esto contrarrestar la deficiencia de Zn en animales, humanos y plantas (Almendros *et al.*, 2014). Ya que, dentro de los sistemas biológicos, el Zn juega un papel importante en procesos como en 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 (Almendros *et al.*, 2014).

No obstante, en los suelos agrícolas un problema recurrente es la disponibilidad de Zn para ser absorbido por las plantas, por lo que se utiliza $ZnSO_4$ como fertilizante para contrarrestar las deficiencias, sin embargo, se ha documentado que este compuesto presenta alta solubilidad con baja eficiencia para ser absorbido en los tejidos de la planta (Gupta *et al.*, 2016). Por esto, es de suma importancia trabajar con nuevas tecnologías que

permitan lograr una fertilización más eficiente del Zn en la producción de alimentos. 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). 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.

HIPÓTESIS Y OBJETIVO

Hipótesis alterna

H₁: La aplicación de nanopartículas metálicas de óxido de Zn (NPsZnO), nanopartículas orgánicas de óxido de Zn (GNPsZnO) y el sulfato de Zn (ZnSO₄) a concentraciones de 25 a 100 mg de Zn/kg de suelo modificará las respuestas agronómicas y fisiológicas del cultivo de frijol.

Hipótesis nula

H₀: La aplicación de nanopartículas metálicas de óxido de Zn (NPsZnO), nanopartículas orgánicas de óxido de Zn (GNPsZnO) y el sulfato de Zn (ZnSO₄) a concentraciones de 25 a 100 mg de Zn/kg de suelo no modificará las respuestas agronómicas y fisiológicas del cultivo de frijol.

Objetivo general

Evaluar el efecto de un el suelo modificado con nanofertilizantes de Zn (concentraciones de 25 a 100 mg Zn/kg suelo), sobre las respuestas agronómicas y fisiológicas en el cultivo de frijol.

REVISIÓN DE LITERATURA

Generalidades del frijol

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.), es uno de los cereales más importantes y consumidos a nivel. Pertenece a la familia *Fabaceae*, también denominada *Leguminosae*, una de las más extensas y de mayor relevancia económica en la agricultura, solo superada por la familia *Poaceae*, que agrupa a los cereales más importantes (Dell'Olmo *et al.*, 2023; Serka *et al.*, 2019). Su historia evolutiva está marcada por procesos de domesticación independientes ocurridos en Mesoamérica y los Andes, que dieron origen a acervos genéticos con características diferenciadas (Rendón *et al.*, 2017). Mesoamérica se reconoce como el centro primario de origen de *Phaseolus vulgaris* L., y diversos estudios han evidenciado la alta diversidad genética existente entre sus accesiones silvestres (Bitocchi *et al.*, 2012).

En este contexto, el frijol común destaca como un alimento básico en diversas culturas, especialmente en América Latina y el Sureste Asiático, donde su cultivo y consumo están profundamente arraigados (Iriti y Varoni, 2017). Siendo la leguminosa de grano más producida y consumida en el mundo, donde su valor de mercado supera a todas las demás leguminosas (Silva *et al.*, 2023). De acuerdo con lo reportado por FAOSTAT, en el año 2023 la superficie mundial destinada a la producción de frijol seco alcanzó aproximadamente 37.75 millones de hectáreas, con una producción estimada de 28.5 millones de toneladas (FAOSTAT, 2023).

Su amplia distribución se puede atribuir a múltiples factores, como la alta disponibilidad, valor nutricional y capacidad de adaptación a diferentes sistemas de cultivo. Por ello, *Phaseolus vulgaris* L., representa una fuente esencial de nutrientes para millones de personas y también desempeña un papel clave en la seguridad alimentaria y la sostenibilidad agrícola a nivel mundial (Smith *et al.*, 2022).

Desde el punto de vista nutricional, el frijol común posee un alto valor debido al equilibrio entre carbohidratos y proteínas, así como a su diversidad de aminoácidos en comparación con otros cereales. Los frijoles proporcionan un aporte de energía de aproximadamente 340 calorías por cada 100 gramos. Así como, el 35 % de los requerimientos diarios de

proteína. Además, contienen vitaminas, fibra dietética y altas concentraciones de micronutrientes. Por mencionar un ejemplo, las semillas de frijol contienen de 4-10 veces más hierro (Fe) y de 2-3 veces más Zn que cereales como el maíz, el trigo y el arroz (Meenu *et al.*, 2023).

Por todo lo anterior, el frijol común es una fuente principal de proteínas y micronutrientes (Fe y Zn), para más de 200 millones de personas en comunidades rurales y urbanas de bajos recursos en África, donde el acceso a otros alimentos es limitado. Se estima que, en América Latina el consumo promedio anual per cápita de frijol común se sitúa entre 10 y 18 kilogramos (Huertas *et al.*, 2022). Además, representa relevancia para la economía agrícola y la seguridad alimentaria global, con un porcentaje significativo de la producción nacional de granos básicos en diversos países durante los últimos ciclos agrícolas (Salgado *et al.*, 2021).

Taxonómicamente, el frijol común se ubica en el orden *Fabales*, familia *Fabaceae*, género *Phaseolus* y especie *vulgaris* (Bevilacqua *et al.*, 2020). Se trata de una especie diploide autógena, con un genoma de aproximadamente 588 megabases, distribuido en 11 pares de cromosomas ($2n=2x=22$) (Chaudhary *et al.*, 2020). Finalmente, el frijol común es esencial para una alimentación adecuada, contribuye a una agricultura más sostenible y al cuidado del medio ambiente. Como una de las principales leguminosas cultivadas, cumple un papel fundamental en el abordaje de desafíos como la seguridad alimentaria, la degradación ambiental y la necesidad de dietas más saludables (Smith *et al.*, 2022; Binagwa *et al.*, 2021).

En términos agronómicos, el frijol común es una leguminosa anual de ciclo corto, cuyo desarrollo y productividad están condicionados por factores genéticos, edafoclimáticos y de manejo. Su ciclo fenológico varía en función de la variedad y del entorno agroclimático, con duraciones que oscilan entre los 70 y 120 días desde la siembra hasta la cosecha (Dost y Khalifa, 2017).

Generalidades del Zn

El Zn es un elemento esencial que desempeña múltiples funciones biológicas en humanos y vegetales. A pesar de requerirse en cantidades reducidas, su impacto sobre la fisiología es fundamental y su deficiencia se asocia con diversas alteraciones metabólicas y

patológicas (Chen *et al.*, 2024). Para el caso de un ser humano, el Zn es el segundo elemento más abundante después del hierro y está presente en aproximadamente una de cada diez proteínas, además es cofactor de más de 300 enzimas y más de 1,000 factores de transcripción. Debido a que un organismo no es capaz de sintetizar Zn, su ingesta dietética es indispensable para mantener funciones celulares clave como la síntesis proteica, el metabolismo de ácidos nucleicos (incluida la replicación del ADN), la transcripción génica, la diferenciación y proliferación celular, así como la mitosis (Stiles *et al.*, 2024).

Importancia del Zn

El Zn es importante para el crecimiento físico, el desarrollo neurológico, la función inmune, la salud reproductiva y la cicatrización de heridas. Algunos estudios epidemiológicos señalan que la deficiencia de Zn es causante de algunas enfermedades infecciosas, con un porcentaje entre 18-22% para infecciones respiratorias bajas, del 11-13% para enfermedades diarreicas y del 10-22% para casos de malaria (Huertas *et al.*, 2022). Presentando diversos síntomas en función de la edad; por ejemplo: en la infancia, es común la diarrea; en niños en edad escolar, se observan problemas dérmicos, infecciones recurrentes y retraso en el crecimiento; mientras que en adultos pueden aparecer infecciones frecuentes, hipogeusia, úlceras cutáneas crónicas y complicaciones en el embarazo (Praharaj *et al.*, 2021). De acuerdo con datos globales, se estima que, más de 1,200 millones de mujeres en edad reproductiva y 372 millones de niños en edad preescolar presentan deficiencia de uno o más micronutrientes esenciales, incluido el Zn (Stiles *et al.*, 2024).

En lo que corresponde a las plantas, el Zn es considerado un micronutriente esencial que participa activamente en múltiples procesos metabólicos. Aunque se requiere en bajas concentraciones, su papel es determinante en el desarrollo y la productividad de los cultivos. Este elemento se encuentra en forma iónica o como parte de complejos con compuestos de bajo peso molecular, participa en la biosíntesis de auxinas, la formación de clorofila, el metabolismo de carbohidratos, lípidos y ácidos nucleicos, así como en la activación de enzimas como anhidrasa carbónica, alcohol deshidrogenasa y superóxido dismutasa (Praharaj *et al.*, 2021).

Estas enzimas desempeñan funciones clave, que serán mencionadas brevemente:

- a) anhidrasa carbónica:** facilita la fijación de dióxido de carbono durante la fotosíntesis.
- b) alcohol deshidrogenasa:** contribuye a la tolerancia a la hipoxia en condiciones de inundación.
- c) superóxido dismutasa:** protege las células vegetales del estrés oxidativo.

Por otra parte, el Zn también está implicado en la estabilidad de membranas celulares, la funcionalidad de los cloroplastos y la regulación génica a través de factores de transcripción tipo "dedo de Zn". Por lo que, condiciones de deficiencia en plantas causa alteraciones morfológicas y fisiológicas como disminución del contenido de clorofila, anomalías en los cloroplastos, menor tolerancia al estrés biótico y abiótico y reducción del rendimiento agrícola (Praharaj *et al.*, 2021). Adicionalmente, el Zn juega un rol importante en la regulación del transporte de agua, la tolerancia a altas temperaturas y la resistencia a patógenos y herbívoros (Praharaj *et al.*, 2021).

En conjunto, estos hallazgos refuerzan la importancia crítica del Zn como micronutriente esencial en la biología humana y vegetal. La comprensión integral de su metabolismo, absorción, distribución intracelular y regulación, tanto en humanos como en plantas, resulta indispensable para abordar sus deficiencias y optimizar estrategias de biofortificación, suplementación y manejo agronómico que contribuyan a mejorar la salud pública y la seguridad alimentaria global (Praharaj *et al.*, 2021).

Deficiencias de Zn

Los problemas por deficiencia de Zn no son exclusivamente de países bajos o en desarrollo. Es un problema a nivel global especialmente para la población de adultos mayores y mujeres premenopáusicas en edad fértil (Prasad, 2014) De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, la deficiencia de Zn representa la quinta causa principal de mortalidad y morbilidad en los países en desarrollo, afectando aproximadamente un tercio de la población mundial (Gammoh y Rink, 2017).

Se estima que 17 % de la población mundial corre el riesgo de una ingesta inadecuada de Zn (Hafeez *et al.*, 2013; Frederickson *et al.*, 2023) y que aproximadamente 2000 millones de personas consumen cantidades insuficientes de Zn en su dieta diaria (Michalczyk y

Cymbaluk, 2020). Además, este problema se intensifica en países en desarrollo, donde las dietas suelen ser ricas en fitatos, compuestos presentes en cereales y legumbres que inhiben la absorción del Zn (Prasad, 2014). De manera general, la deficiencia de Zn constituye un problema de salud pública global, con implicaciones significativas en el desarrollo físico, el sistema inmunológico y la salud reproductiva.

Debido a lo anterior, la deficiencia de Zn representa un desafío significativo en la agricultura global, impactando negativamente el crecimiento y el rendimiento de diversos cultivos (Martins *et al.*, 2020; Parmar *et al.*, 2020). Este problema es particularmente prevalente en suelos con características específicas, tales como alcalinidad elevada o bajo contenido de materia orgánica, que limitan la disponibilidad de Zn para las plantas (Poudel *et al.*, 2023). El Zn, como micronutriente esencial, desempeña un papel crucial en numerosos procesos fisiológicos y bioquímicos dentro de la planta, incluyendo la síntesis de proteínas, la regulación enzimática y el metabolismo de carbohidratos y auxinas (Rani *et al.*, 2022). La insuficiencia en este elemento puede desencadenar una serie de síntomas visibles en una planta, afectando su desarrollo general y su capacidad productiva.

El conocimiento detallado de estos síntomas y de los factores edáficos que contribuyen a la deficiencia de Zn es fundamental para implementar estrategias de manejo eficientes que permitan corregir esta deficiencia y asegurar la salud y productividad de los cultivos (Naseem *et al.*, 2020; Pacheco *et al.*, 2022). Además, el Zn es crucial para la absorción de nitrógeno y su metabolismo, la calidad de las proteínas, la actividad fotosintética, la síntesis de clorofila y la actividad de la anhidrasa carbónica, la resistencia al estrés biótico y abiótico y la protección contra el daño oxidativo (Ariraman *et al.*, 2020).

Biofortificación y el uso nanopartículas

La deficiencia de micronutrientes como la vitamina A, Zn y hierro (Fe) representa un problema de salud pública en países en desarrollo, que afecta a miles de millones de personas. Una de las estrategias para mitigar esta problemática consiste en la biofortificación de cultivos, la cual es una técnica novedosa y prometedora (Hotegni *et al.*, 2024). Particularmente, la biofortificación agronómica, que es considerada una estrategia rentable y sostenible que permite mejorar las características agronómicas de los cultivos e incrementar el contenido de micronutrientes en sus partes comestibles, mediante

la aplicación de nutrientes por vía edáfica, foliar o en solución nutritiva (Preciado *et al.*, 2022).

Actualmente, se reconocen tres tipos principales de biofortificación agrícola:

1. Biofortificación convencional: basada en la selección y cruzamiento de variedades que presentan naturalmente altos niveles del nutriente deseado (Siwela *et al.*, 2020).

2. Biofortificación agronómica: que emplea la aplicación externa de nutrientes mediante fertilización edáfica o foliar para aumentar su concentración en los tejidos vegetales (Preciado *et al.*, 2022; Siwela *et al.*, 2020).

3. Biofortificación por ingeniería genética: que introduce genes específicos en el genoma de la planta con el objetivo de aumentar su densidad nutricional (Siwela *et al.*, 2020).

En el caso particular de la biofortificación agronómica, recientemente se ha utilizado la nanotecnología como herramienta para la elaboración de nutrientes alternativos para el tratamiento de cultivos. Esto debido a que permite la obtención de materiales con tamaño nanométrico (1–100 nm), los cuales presentan propiedades únicas como una mayor área superficial, liberación controlada y disponibilidad sostenida de formas iónicas, mejorando significativamente la eficiencia en el uso de nutrientes (Ruiz *et al.*, 2021) y disminuyendo los problemas asociados al uso excesivo de fertilizantes convencionales (Kumari y Singh, 2019).

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental y material genético

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo durante el ciclo agrícola invierno-primavera 2025 en el quinto invernadero de tipo túnel con una infraestructura de mediana tecnología, del campo experimental de la UAAAN ubicado en Saltillo Coahuila, a una latitud de 25°21'19.5" N, una longitud de 101°01'49.7" W y una altitud de 1,731 msnm. Las condiciones ambientales oscilaron entre 25-28 °C de temperatura y 65-75 % de humedad relativa. El material genético usado para esta investigación fue frijol ejotero de la variedad Strike adquirido de Semillas El Trébol ®.

Materiales

Las nanopartículas de óxido de Zn comerciales (NPsZnO, polvo <100 nm) y el sulfato de Zn ($ZnSO_4 \cdot H_2O$) fueron obtenidos de Sigma-Aldrich ®. Las nanopartículas de óxido de Zn fueron sintetizadas mediante síntesis verde (GNPsZnO) en el Departamento de Ciencias Básicas de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), siguiendo la metodología establecida por Neira-Vielma et al. (2022)

Síntesis y caracterización de GNPsZnO

La determinación de la estructura cristalina de las GNPsZnO 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° 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 transmisión de alta resolución modelo FEI Titan 80-300.

Manejo del cultivo

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 (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 $0.41 \mu S \text{ cm}^{-1}$. El ciclo del cultivo tuvo una duración de 92 días.

Variables evaluadas

Parte de los datos se obtuvieron durante la etapa de madurez fisiológica, mientras que el resto en el laboratorio de ensayos de semillas del Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas (CCDTS) a partir de los granos cosechados. Las variables que fueron evaluadas se describen con mayor detalle a continuación:

- **Altura de planta (cm):** Largo de la planta fue medido de la base del tallo hasta el ápice de la misma, utilizando un flexómetro truper (modelo FH-8M).
- **Diámetro del tallo (mm):** Se realizó a una altura de 5 cm sobre la base del tallo, utilizando un vernier digital.
- **Contenido de clorofila:** Se midió utilizando un medidor portátil Yieryi (modelo MQ-YLS), expresado en unidades 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 las concentraciones como factor B (25, 50, 75 y 100 mg kg^{-1}), cada tratamiento tuvo cuatro repeticiones, considerando cuatro macetas como tratamiento control, para un total de 52 macetas experimentales.

Aplicación de tratamientos

La aplicación de los tratamientos se llevó a cabo manualmente directamente al suelo, para formando una mezcla del suelo uniforme, con los diferentes compuestos. En el Cuadro 1, se muestran las cantidades utilizadas de ZnSO_4 , NPsZnO y GNPsZnO por cada kilogramo

de suelo, con la finalidad de preparar los sustratos con diferentes concentraciones de Zn (25, 50, 75 y 100 mg kg⁻¹).

Cuadro 1. Cantidades de ZnSO₄, NPsZnO y GNPsZnO utilizadas para la preparación de sustratos a las diferentes concentraciones de Zn.

Concentración de Zn (%)	ZnSO ₄ (mg)	NPsZnO/GNPsZnO (mg)
25	46.2963	23.338275
50	92.5926	46.676625
75	138.8889	70.0149
100	185.1852	93.35325

Análisis estadístico

El efecto de los factores de variación se determinó mediante un 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

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

Donde:

y_{ij} = observación de la unidad experimental.

μ = media general de la variable observada.

A_i = efecto de tratamiento (NPs ZnO, BNPs ZnO, ZnSO₄).

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

ε_{ij} = error experimental.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de diferentes fuentes de Zn en parámetros agronómicos

En el Cuadro 2, se puede observar el efecto de las fuentes de variación utilizados en este estudio. Para la fuente de variación tratamiento, se pudo observar que las variables altura, diámetro y rendimiento de grano se afectaron significativamente ($p < 0.05$). Para la fuente de variación concentración, las variables altura, peso de vaina, rendimiento de vaina y grano se modificaron significativamente. En cuanto a la interacción, peso de vaina, área foliar, rendimiento de vaina y de grano se modificaron significativamente. En el siguiente cuadro que corresponde a la comparación de medias, discutimos a detalle los impactos generados por fuente de variación y la interacción.

Comportamiento agronómico por tipo de fertilizante

De acuerdo con los resultados del Cuadro 3, el tipo de fertilizante afectó la altura de planta, donde se observa un incremento con los tratamientos de Zn en comparación con el testigo, el incremento fue del 9.49%. Sin embargo, no existen diferencias significativas entre los tratamientos de Zn para esta variable ($p < 0.05$). Para el diámetro de tallo, las GNPsZnO presentaron el valor más bajo, con una disminución del 5.13% en comparación con las demás fuentes de Zn y el testigo. El rendimiento de grano fue mejor en todos los tratamientos con Zn, superando en promedio con 25% al testigo. Resultados similares han sido reportados por Bautista *et al.* (2021), quienes informan que las NPsZnO incrementan la absorción de Zn y mejoran la biomasa y el rendimiento en frijol bajo condiciones de invernadero. Aunque su estudio se enfoca en el estudio de pigmentos fotosintéticos y compuestos bioactivos, sus resultados respaldan la efectividad de las nanopartículas como alternativa para mejorar la productividad agrícola.

Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza para parámetros agronómicos sometidas a diferentes compuestos de Zn.

FV	GL	CHL (Spad)	N (mg/g)	ALT (cm)	DMT (mm)	PV (g)	AF (cm ²)	REND VA (kg ha ⁻¹)	REND GR (kg ha ⁻¹)
Tratamiento	3	4.45715	40.69266	42.684*	0.67*	0.46	28584.55	414511.1	47223.59*
Concentración	3	35.0737	65.62295	35.682*	0.26	0.9*	11545.85	811406.28*	63166.71*
Trat*Conc	6	65.4331	98.41055	19.615	0.17	0.18*	17860.97*	162699.42*	8206.01*
Error	39	416.892	559.3705	203	3.51	4.90	109444.73	4419301.36	257150.3
C.V.		7.7392	27.1884	7.7388	7.12	15.01	19.31	15.01	18.81

*, **= Significativo al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad, respectivamente; FV= Fuentes de variación; GL= Grados de libertad; C.V.= Coeficiente de variación; Trat= Tratamiento; Conc= Concentración; CHL = Clorofila; N = Nitrógeno; ALT= Altura; DMT= Diámetro; PV= Peso de vaina; AF= Área foliar; REND VA= Rendimiento de vaina; REND GR= Rendimiento de grano.

Cuadro 3. Comparación de medias por el tipo de fertilizante para parámetros agronómicos sometidas a diferentes compuestos de Zn.

Tipo de fertilizante	CHL (Spad)	N (mg/g)	ALT (cm)	DMT (mm)	PV (g)	AF (cm ²)	REND VA (kg ha ⁻¹)	REND GR (kg ha ⁻¹)
Testigo	41.458 a	12.983 a	26.875 b	4.55 a	2.04 a	246.24 a	1934.82 a	330.35 b
ZnSO ₄	42.198 a	13.316 a	28.969 ab	4.213 ab	2.38 a	264.2 a	2257.83 a	431.01 a
NPs ZnO	42.154 a	13.465 a	30.188 a	4.24 ab	2.40 a	257 a	2278.57 a	440.44 a
GNPsZnO	42.581 a	15.244 a	29.938 a	4.1 b	2.39 a	308.77 a	2269.06 a	449.22 a

Letras diferentes significa que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). CHL = Clorofila; N = Nitrógeno; ALT= Altura; DMT= Diámetro; PV= Peso de vaina; AF= Área foliar; REND VA= Rendimiento de vaina; REND VA= Rendimiento de

Comportamiento agronómico por la concentración aplicada

Para la fuente de variación niveles de concentración de Zn (Cuadro 4), se observó que las características morfológicas y los componentes de rendimiento respondieron de forma diferencial a las distintas dosis aplicadas. En cuanto a la altura de planta, todas las concentraciones superaron en promedio con 27.12% al testigo ($p < 0.05$). En lo que respecta al peso de vaina, se observó un incremento progresivo con el aumento de la dosis, alcanzando su valor máximo a 75 mg de Zn kg^{-1} de suelo (2.58 g), este valor fue estadísticamente superior al obtenido en el testigo (2.04 g). El rendimiento de vaina también tuvo un incremento promedio de 14.7% en comparación con el testigo, mientras que el rendimiento de grano tuvo un incremento promedio del 9.8%. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Shukry *et al.* (2019), quienes señalan que las concentraciones elevadas de Zn pueden resultar tóxicas y limitar el crecimiento vegetal, mientras que las dosis bajas promueven el desarrollo de este. El efecto se atribuye a la función del Zn en la síntesis de triptófano, un precursor de la auxina, hormona clave en la regulación del crecimiento vegetal.

Cuadro 4. Comparación de medias por el nivel de concentración para parámetros agronómicos sometidas a diferentes compuestos de Zn.

Concentración	CHL (Spad)	N (mg/g)	ALT (cm)	DMT (mm)	PV (g)	AF (cm ²)	REND VA (kg ha-1)	REND GR (kg ha-1)
Testigo	41.628 a	12.983 a	26.875 b	4.55 a	2.04 b	246.24 a	1934.82 b	330.35 b
25	42.923 a	13.528 a	30.708 a	4.192 a	2.20 ab	256.03 a	2092.51 ab	430.38 ab
50	41.628 a	13.309 a	30.292 a	4.14 a	2.42 ab	297.32 a	2301.53 ab	451.21 a
75	41.328 a	13.174 a	29.292 ab	4.1 a	2.58 b	269.24 a	2452.52 b	489.88 a
100	43.367 a	16.022 a	28.5 ab	4.308 a	2.34 ab	284.04 a	2227.39 ab	389.43 ab

Letras diferentes significa que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). CHL = Clorofila; N = Nitrógeno; ALT= Altura; DMT= Diámetro; PV= Peso de vaina ; AF= Área foliar; REND VA= Rendimiento de vaina; REND VA= Rendimiento de grano.

Interacción entre el tipo de fertilizante y concentración de Zn

En este apartado, solo se presentarán las interacciones que presentaron efectos significativos, como es el caso del área foliar, peso de vaina, rendimiento de grano y de vaina.

Área foliar y peso en vaina

En la Figura 1, se presentan los resultados obtenidos para la interacción de los tipos de fertilizantes de Zn y las concentraciones, podemos observar que en el área foliar (Figura 1A), el mayor valor de área foliar se registró con el tratamiento GNPs ZnO a una concentración de 75 mg de Zn kg⁻¹ de suelo, alcanzando los 326.62 cm². En contraste, el valor más bajo correspondió a ZnSO₄ a 25 mg de Zn kg⁻¹ de suelo, con un área foliar de 235.49 cm². El testigo mostró un valor intermedio de 246.24 cm². El estudio de Nofal *et al.* (2024), mostró que la aplicación de NPs ZnO ayudó a reducir los efectos tóxicos del cadmio en plantas, especialmente en etapas más avanzadas (30 días). El tratamiento más efectivo fue NPs ZnO a 200 mg L⁻¹ con Cd 100, que mantuvo el mayor valor de área foliar (39.67 cm²), demostrando que el Zn puede contrarrestar el estrés por metales pesados y mejorar la tolerancia fisiológica de las plantas.

Respecto al peso en vaina (Figura 1B), 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 kg⁻¹, 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.

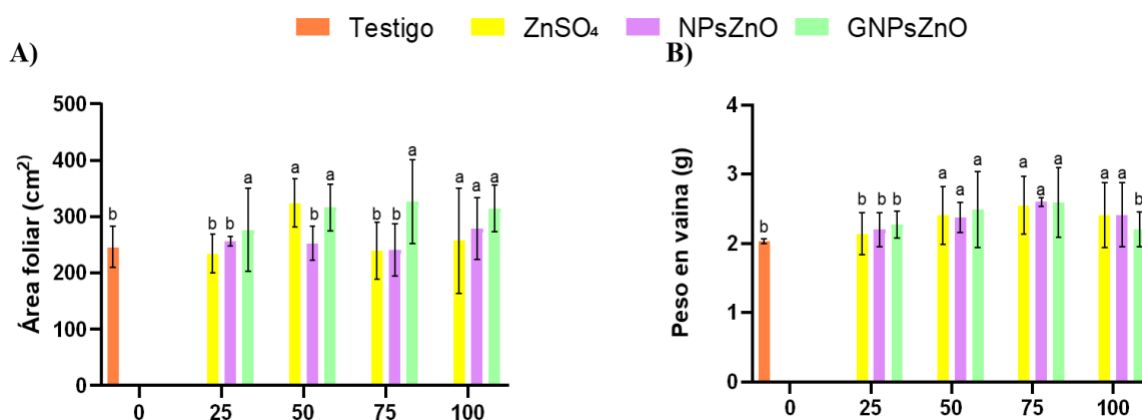


Figura 1. Área foliar (A) y peso en vaina (B) sometidos a diferentes tratamientos de Zn con concentraciones de 0 a 100 mg de Zn/kg de suelo. Los valores son el promedio de las cuatro repeticiones (n=4). Las barras representan la desviación estándar de la media. Letras diferentes en cada barra significa que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

Rendimiento de grano y en vaina

Los resultados obtenidos para el rendimiento de grano y en vaina (Figura 2) muestran que hay diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos evaluados, lo cual indica que el tipo de fertilizante (ZnSO₄, NPsZnO y GNPZnO) y la concentración aplicada generaron un efecto marcado sobre el rendimiento del cultivo. En el caso del rendimiento en grano de frijol (Figura 2A), los mejores valores se obtuvieron con el tratamiento GNPZnO a una concentración de 75 mg Zn kg⁻¹ 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 2B), el tratamiento más destacado fue el de NPsZnO a una concentración de mg Zn kg⁻¹ 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.

El estudio realizado en Colombia por Tofiño *et al.* (2019), reportaron que en el cultivo de frijol se obtuvo rendimiento de 1.280 t/ha promedio regionales y nacionales al presentar un mayor número de vainas y semillas (25% y 15% adicionales, respectivamente), así como un incremento en el peso de los granos (37% adicional). Este mejor desempeño agronómico estuvo directamente asociado con un mayor contenido de micronutrientes (100% más de Fe y 40% más de Zn). Por otra parte, Salehi *et al.* (2021) señalan que, aunque la aplicación de nanomateriales de Zn puede estimular el crecimiento, dosis elevadas pueden tener un efecto negativo en la etapa reproductiva de las plantas, afectando la formación de semillas y la calidad del grano. Este fenómeno, que se debe a la inducción de estrés oxidativo, podría explicar por qué el incremento en el rendimiento. En conjunto, los resultados indican que el Zn es un micronutriente esencial para el desarrollo de las plantas, incluso en pequeñas cantidades, tiene un papel activo en la producción de auxina, una hormona de crecimiento crucial, al ser un precursor del triptófano. Por lo tanto, el aumento de la altura que observaste en todos los tratamientos con Zn, sin importar la forma o concentración, es coherente con su función promotora del crecimiento (Shukry *et al.* (2019).

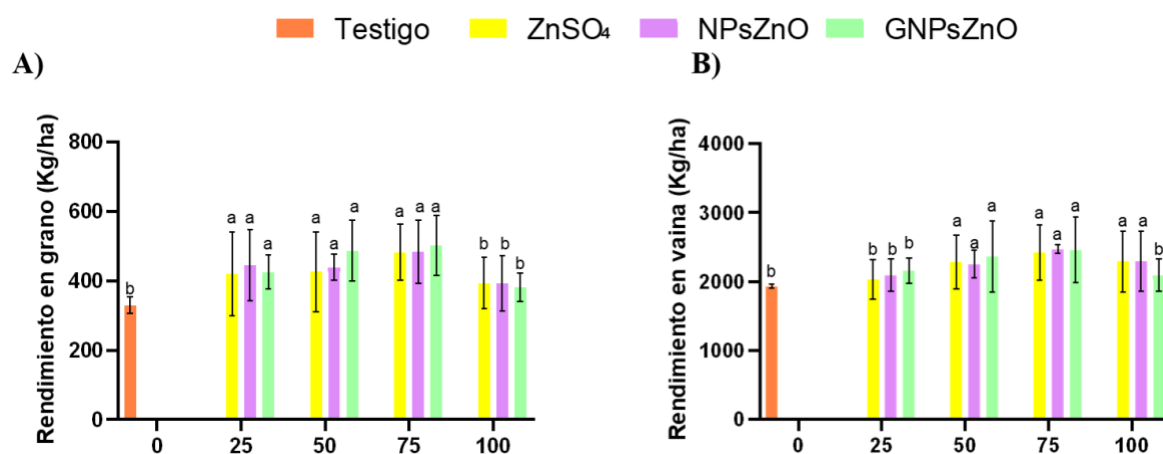


Figura 2. Rendimiento en grano (A) y en vaina (B) sometidos a diferentes tratamientos de Zn con concentraciones 0 a 100 mg de Zn/kg de suelo. Los valores son el promedio de las cuatro repeticiones (n=4). Las barras representan la desviación estándar de la media. Letras diferentes en cada barra significa que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

CONCLUSIONES

Los resultados indican que las fuentes de variación tipo de fertilizante y concentración influyen significativamente en algunas de las variables agronómicas evaluadas, como la altura, diámetro, rendimiento de grano y de vaina. Sin embargo, para la fuente de variación tipo de fertilizante, no se presenta un comportamiento homogéneo en cuanto a las respuestas agronómicas del cultivo. Por otra parte, para la fuente de variación concentración, las mejores respuestas se obtuvieron con 75 mg de Zn kg⁻¹ de suelo, con mejoras en el diámetro y peso de vaina. Para la interacción, nuevamente los mejores resultados en cuando 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.

REFERENCIAS

- Almendros, P., Obrador, A., Álvarez, J. M., González, D., & Machado, R. (2014). El caso del Zn: Biofortificación de cereales con micronutrientes (pp. 686–688). *Nutrición y Sanidad Vegetal*. [PDF]. Universidad de Évora. <https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/11869/1/biofortificacão.pdf>
- Álvarez Ariza, A. A., & César Solano, M. E. (2019). Déficit de Zn y desnutrición: La fortificación como solución (p. 44). Repositorio Universidad del Sinú. <http://repositorio.unisinucartagena.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/320/1/DEFICIT%20DE%20ZN%20Y%20DNT.pdf>
- Ariraman, R., Selvakumar, S., Mansingh, M. D. I., Karthikeyan, M., & Vasline, Y. A. (2020). Effect of Zn Application on Growth, Yield Parameters, Nutrient Uptake, Yield and Economics of Maize. <https://arccjournals.com/journal/agricultural-reviews/R-2098>
- Bautista-Diaz, J., Cruz-Alvarez, O., Hernández-Rodríguez, O. A., Sánchez-Chávez, E., Jacobo-Cuellar, J. L., Preciado-Rangel, P., Avila-Quezada, G. D., & Ojeda-Barrios, D. L. (2021). Zn sulphate or Zn nanoparticle applications to leaves of green beans. *Folia Horticulturae*, 33(2), 365-375. <https://doi.org/10.2478/fhort-2021-0028>
- Bevilacqua, V., Vitti, A., Logozzo, G., Marzario, S., Gioia, T., & Nuzzaci, M. (2020). Influence of cultivation areas on the seed-borne pathogens on two local common bean ecotypes of “Fagioli di Sarconi” PGI (*Phaseolus vulgaris* L.). *Biology and Life Sciences Forum*, 57. <https://doi.org/10.3390/iecps2020-08593>
- Binagwa, P. H., Traore, S. M., Egnin, M., Bernard, G. C., Ritte, I., Mortley, D., Kamfwa, K., He, G., & Bonsi, C. (2021). Genome-wide identification of powdery mildew resistance in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Frontiers in Genetics*, 12. <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.673069>
- Bitocchi, E., Nanni, L., Bellucci, E., Rossi, M., Giardini, A., Zeuli, P. S., Logozzo, G., Stougaard, J., McClean, P., Attene, G., & Papa, R. (2012). Mesoamerican origin of the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is revealed by sequence data.

Proceedings of the National Academy of Sciences, 109(14), 588-597.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1108973109>

Chaudhary, A. R., Solanki, S. D., Rahevar, P. M., & Patel, D. A. (2020). Genetic variability, correlation and path coefficient analysis for yield and its attributing traits in cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp] accessions. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(2), 1281-1293.
<https://doi.org/10.20546/ijemas.2020.902.151>

Chen, B., Yu, P., Chan, WN *et al.* Metabolismo celular del Zn y señalización del Zn: de las funciones biológicas a las enfermedades y dianas terapéuticas. *Sig Transduct Target Ther* 9, 6 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41392-023-01679-y>

Dell'Olmo, E., Zaccardelli, M., Basile, B., Corrado, G., & Sigillo, L. (2023). Identification and characterization of new seedborne pathogens in *Phaseolus vulgaris* landraces of Southern Italy. *Pathogens*, 12(1), 108.
<https://doi.org/10.3390/pathogens12010108>

Dost, R., & Khalifa, A. (2017). Water next Tuesday: eLEAF's irrigation-advice service in the Gezira Scheme in Sudan (CTA Technical Brief No. 8). Wageningen: CTA.

FAOSTAT. (2023). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Cantidad de producción de frijol. <http://faostat.fao.org>

Fonseca, Z., Quesada, A., Meireles, M., & Cabrera, E. (2022). La malnutrición: un problema de salud pública de escala mundial. *Revista Médica*, 24(1), 237–246.
<https://orcid.org/0000-0002-7581-8013>

Frederickson, C. J., Fleming, D. E. B., Asael, D., Zaman, M., Ferguson, R., Kaiser, M. G., Rankin, B. D., Schenkels, K. M. M., Hess, A. I. T., Scott, A. R., Frederickson, C. J. M., Sinclair, J. K., & Lowe, N. M. (2023). Single hair analysis by X-ray fluorescence spectrometry detects small changes in dietary Zn intake: A nested randomized controlled trial. *Frontiers In Nutrition*, 10.
<https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1139017>

Gammoh, N., & Rink, L. (2017). Zn in Infection and Inflammation. *Nutrients*, 9(6), 624.
<https://doi.org/10.3390/nu9060624>

- García-López, J. I., Niño-Medina, G., Olivares-Sáenz, E., Lira-Saldívar, R. H., Barriga-Castro, E. D., Vázquez-Alvarado, R., Rodríguez-Salinas, P. A., & Zavala-García, F. (2019). Foliar Application of Zn Oxide Nanoparticles and Zn Sulfate Boosts the Content of Bioactive Compounds in Habanero Peppers. *Plants*, 8(8), 254. <https://doi.org/10.3390/plants8080254>
- Gupta, A., Bharati, R., Kubes, J., Popelkova, D., Praus, L., Yang, X., Severova, L., Skalicky, M., & Brestic, M. (2024). Zn oxide nanoparticles application alleviates salinity stress by modulating plant growth, biochemical attributes and nutrient homeostasis in *Phaseolus vulgaris* L. *Frontiers In Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1432258>
- Gupta, N., Ram, H., & Kumar, B. (2016). Mechanism of Zn absorption in plants: Uptake, transport, translocation and accumulation. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 15(1), 89–109. <https://doi.org/10.1007/s11157-016-9390-1>
- Hafeez, B., Khanif, Y. M., & Saleem, M. (2013). Role of Zn in Plant Nutrition- A Review. *American Journal of Experimental Agriculture*, 3(2), 374-391. <https://doi.org/10.9734/ajea/2013/2746>
- Hotegni, N. V. F., Sohindji, F. S., Salaou, M. A., Agbandou, P. C., Azonhoumon, L. W., Tchokponhoué, D., Houdegbe, C., Adjé, C. A., & Achigan-Dako, E. G. (2024). Agronomic biofortification of cereals and legumes with iron, Zn, calcium and magnesium for food and nutrition security: Available options for farmers in Sub-Saharan Africa. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18, 101391. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101391>
- Huertas, R., Karpinska, B., Ngala, S., Mkandawire, B., Maling'a, J., Wajenkeche, E., Kimani, P. M., Boesch, C., Stewart, D., Hancock, R. D., & Foyer, C. H. (2022). Biofortification of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) with iron and Zn: Achievements and challenges. *Food and Energy Security*, 12(2). <https://doi.org/10.1002/fes3.406>

- Iriti, M., & Varoni, E. (2017). Pulses, healthy, and sustainable food sources for feeding the planet. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(2), 255. <https://doi.org/10.3390/ijms18020255>
- Kihara, J., Sileshi, G. W., Bolo, P., Mutambu, D., Senthilkumar, K., Sila, A., Devkota, M., & Saito, K. (2024). Maize-grain zinc and iron concentrations as influenced by agronomic management and biophysical factors: a meta-analysis. *Food Security*, 16(5), 1147-1173. <https://doi.org/10.1007/s12571-024-01478-5>
- Kumari, R., & Singh, D. P. (2019). Nano-biofertilizer: An emerging eco-friendly approach for sustainable agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 90(4), 733–741. <https://doi.org/10.1007/s40011-019-01133-6>
- Martins, N. C. T., Avellan, A., Rodrigues, S., Salvador, D., Rodrigues, S. M., & Trindade, T. (2020). Composites of Biopolymers and ZnO NPs for Controlled Release of Zn in Agricultural Soils and Timed Delivery for Maize. *ACS Applied Nano Materials*, 3(3), 2134-2148. <https://doi.org/10.1021/acsanm.9b01492>
- Meenu, M., Chen, P., Mradula, M., Chang, S. K. C., & Xu, B. (2023). New insights into chemical compositions and health-promoting effects of black beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Food Frontiers*, 4(3), 1019-1038. <https://doi.org/10.1002/fft2.246>
- Michalczyk, K., & Cymbaluk-Płoska, A. (2020). The Role of Zn and Copper in Gynecological Malignancies. *Nutrients*, 12(12), 3732. <https://doi.org/10.3390/nu12123732>
- Naseem, F., Zhi, Y., Farrukh, M. A., Hussain, F., & Yin, Z. (2020). Mesoporous $\text{ZnAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{24}$ nanofertilizers enable high yield of *Oryza sativa* L. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67611-4>
- Neira-Vielma, A. A., Meléndez-Ortiz, H. I., García-López, J. I., Sanchez-Valdes, S., Cruz-Hernández, M. A., Rodríguez-González, J. G., & Ramírez-Barrón, S. N. (2022). Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using Pecan Nut (*Carya illinoensis*) Shell Extracts and Evaluation of Their Antimicrobial Activity. *Antibiotics*, 11(9), 1150. <https://doi.org/10.3390/antibiotics11091150>

- Nofal, A., Maswada, H., Zedan, A., & Elsheery, N. (2024). The Physiological Effect of Foliar Spraying of Zn Nanoparticles in Reducing the Harmful Effects of Cadmium on Faba Bean Plants. *Journal Of Sustainable Agricultural and Environmental Sciences*, 3(1), 98-105. <https://doi.org/10.21608/jsaes.2024.270332.1080>
- Pacheco-Sangerman, F., Prado-Hernández, V., Torres, R. M., & Robledo-Santoyo, E. (2022). Diagnóstico nutrimental del suelo y foliar en el cultivo de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(6), 1079-1090. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i6.2691>
- Parmar, C. D., R. R. Kharadi, Bhuriya, K. P. 2020. Influence by Various Zn and Iron Treatments on Micronutrients Content and Uptake of Grain and Stover of Pearl Millet. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* 9(10): 1247-1252. doi: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.910.150>
- Poudel, P., Di Gioia, F., Lambert, J. D., & Connolly, E. L. (2023). Zn biofortification through seed nutri-priming using alternative Zn sources and concentration levels in pea and sunflower microgreens. *Frontiers In Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1177844>
- Praharaj, S., Skalicky, M., Maitra, S., Bhadra, P., Shankar, T., Brestic, M., Hejnak, V., Vachova, P., & Hossain, A. (2021). Zn Biofortification in Food Crops Could Alleviate the Zn Malnutrition in Human Health. *Molecules*, 26(12), 3509. <https://doi.org/10.3390/molecules26123509>
- Prasad, A. S. (2014). Zn is an Antioxidant and Anti-Inflammatory Agent: Its Role in Human Health. *Fronteras In Nutrition*, 1. <https://doi.org/10.3389/fnut.2014.00014>
- Preciado-Rangel, P., Valenzuela-García, A. A., Pérez-García, L. A., González-Salas, U., Ortiz-Díaz, S. A., Buendía-García, A., & Puente, E. o. R. (2022). La biofortificación foliar con hierro mejora la calidad nutracéutica y la capacidad antioxidante en lechuga. *Terra Latinoamericana*, 40. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1060>

- Rani, S., Kumar, P., Dahiya, P., Dang, A. S., & Suneja, P. (2022). Biogenic Synthesis of Zn Nanoparticles, Their Applications, and Toxicity Prospects. *Frontiers In Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.824427>
- Rendón-Anaya, M., Montero-Vargas, J. M., Saburido-Álvarez, S., et al. (2017). Genomic history of the origin and domestication of common bean unveils its closest sister species. *Genome Biology*, 18, 60. <https://doi.org/10.1186/s13059-017-1190-6>
- Ruiz-Torres, N., Flores-Naveda, A., Barriga-Castro, E. D., Camposeco-Montejo, N., Ramírez-Barrón, S., Borrego-Escalante, F., Niño-Medina, G., Hernández-Juárez, A., Garza-Alonso, C., Rodríguez-Salinas, P., & García-López, J. I. (2021). Zn oxide nanoparticles and Zn sulfate impact physiological parameters and boosts lipid peroxidation in soil grown coriander plants (*Coriandrum sativum*). *Molecules*, 26(7), 1998. <https://doi.org/10.3390/molecules26071998>
- Sainz Mendoza, L. (2019). Efecto comparativo de diferentes formas de Zn en la biofortificación de tomate cherry (*Lycopersicon esculentum*) en condiciones de invernadero [Tesis de maestría]. Universidad de Almería. http://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/8165/TFM_SAINZ%20MENDOZA,%20LUIS.pdf?sequence=1
- Salehi, F., Amiri, R., Alizadeh, F. M., & Hosseini, S. A. (2021). Aerially Applied Zn Oxide Nanoparticle Affects Reproductive Components and Seed Quality in Fully Grown Bean Plants (*Phaseolus vulgaris* L.). *Frontiers in Plant Science*, 12, 808141. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.808141>.
- Salgado, M. V., Portillo-Vázquez, M., De Jesús Brambila-Paz, J., Martínez-Damián, M. Á., & Medina-Cuellar, S. E. (2021). Óptimos económicos de fertilizante en la producción de maíz blanco en Valles Altos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(8), 1391-1400. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i8.2685>
- Serka, S., Getahun, D., & Abegaz, K. (2019). Formulation and sensory acceptability of flat bread from kocho with broad bean (*Vicia faba* L.) and quality protein maize (*Zea mays*) flours. *Journal of Food Processing & Technology*, 10(9). <https://doi.org/10.35248/2157-7110.19.10.812>

- Shukry, W. M., & Al-Osaimi, A. A. (2019). Effect of sequential concentrations of Zn and its combination with calcium or glutathione on the growth, water relations and anatomy of roots, stems and leaves of *Phaseolus vulgaris* cv. Contender. *International Journal of Research - GRANTHAALAYAH*, 7(11), 1–18. <https://doi.org/10.29121/granthaalayah.v7.i11.2020.329>.
- Silva, M., Hinojosa-Reyes, L., Rosas-Castor, J., Quero-Jiménez, P., Pino-Sandoval, D., & Guzmán-Mar, J. (2023). Heavy metals and metalloids accumulation in common beans (*Phaseolus vulgaris* L.): A review. *Chemosphere*, 335, 139010. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139010>
- Siwela, M., Pillay, K., Govender, L., Lottering, S., Mudau, F. N., Modi, A. T., & Mabhaudhi, T. (2020). Biofortified crops for combating hidden hunger in South Africa: Availability, acceptability, micronutrient retention and bioavailability. *Foods*, 9(6), 815. <https://doi.org/10.3390/foods9060815>
- Smith, M. R., Dinglasan, E., Veneklaas, E., Polania, J., Rao, I. M., Beebe, S. E., & Merchant, A. (2022). Effect of drought and low P on yield and nutritional content in common bean. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.814325>
- Stiles, L. I., Ferrao, K., & Mehta, K. J. (2024). Role of Zn in health and disease. *Clinical And Experimental Medicine*, 24(1). <https://doi.org/10.1007/s10238-024-01302-6>
- Tofiño, A., Cordero, C., Rozo, Y. y Tamayo, P. (2019). Frijol biofortificado Corpoica Rojo 39: proceso de obtención varietal y sistema productivo para el Caribe seco. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia. <http://editorial.agrosavia.co/index.php/publicaciones/catalog/download/33/29/52/11?inline=1>.