

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Efecto de Nanomateriales de ZnO en la Productividad Agronómica de Sorgo Blanco
(*Sorghum bicolor* L. Moench)

Por:

URIEL BARRETO SANDOVAL

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Efecto de Nanomateriales de ZnO en la Productividad Agronómica de Sorgo Blanco
(*Sorghum bicolor* L. Moench)

Por:

URIEL BARRETO SANDOVAL

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Aprobado por el Comité de Asesoría:



Dr. Josué Israel García López
Asesor Principal



Dr. Antonio Flores Naveda
Coasesor



Dra. Norma Angélica Ruiz Torres
Coasesor



Dr. Jerónimo Landeros Flores
Coordinador Interino de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2023

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante:

Uriel Barreto Sandoval.
URIEL BARRETO SANDOVAL

AGRADECIMIENTOS

PARA MI ALMA TERRA MATER

Quiero agradecer a mi gran y gloriosa Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por abrirme sus puertas para formar parte de esta magnífica institución, la cual me dio bellos momentos y conocimiento de calidad.

A MIS PADRES

Quiero agradecer a mi padre Clemente Barreto y mi madre María Rivera por darme la oportunidad junto con el apoyo para poder concluir mis estudios universitarios.

PARA MIS HERMANOS

Agradezco a mis hermanos José Luis, Raúl, Mirian y Marian por brindarme su apoyo y confianza en mis estudios universitarios.

A MÍ ASESOR

Al Dr. Josué Israel García López le agradezco por la ayuda en mi estancia universitaria, sus consejos y asesorías en mi formación profesional.

A LOS PROFESORES DE LA UAAAN

Gracias a todos los profesores de mi Terra Mater por compartir sus conocimientos y prácticas para mi formación profesional.

A MIS AMIGOS

Le agradezco a todos mis amigos que conocí en mi tiempo universitario, por todos los momentos y ayuda que me brindaron en mi estancia universitaria.

ÍNDICE GENERAL DEL CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE GENERAL DEL CONTENIDO	v
ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
RESUMEN.....	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Hipótesis	2
1.2 Objetivo	2
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1 El Zinc en la nutrición de plantas.....	3
2.2 Nanomateriales en la agricultura.....	5
2.3 Impacto de nanomateriales en la agricultura.....	9
3. MATERIALES Y MÉTODOS	13
3.1 Material genético	13
3.2 Fuentes de Zn	13
3.3 Condiciones de crecimiento y diseño experimental de siembra	13
3.4 Evaluación de componentes agronómicos	14
3.5 Análisis estadístico.....	14
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	15
4.1 Resultados del ANOVA	15
4.2 Respuesta de la altura de planta.....	16
4.3 Diámetro de tallo y rendimiento.....	16
5. CONCLUSIONES	19
6. LITERATURA CITADA.....	20

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza de parámetros agronómicos en Sorgo por la aplicación de dos nanomateriales a base de Zn.	15
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Altura de plantas de sorgo por la aplicación de NPs ZnO y GNPs ZnO a concentraciones de 0, 25, 50, 75, 100 y 125 mg Zn/kg suelo.....	16
Figura 2. Diámetro de tallo (a) y rendimiento de grano en plantas de sorgo por la aplicación de NPs ZnO y GNPs ZnO a concentraciones de 0, 25, 50, 75, 100 y 125 mg Zn/kg suelo.....	17

RESUMEN

En este estudio se evaluó el impacto de nanopartículas metálicas (NPs ZnO) y orgánicas (GNPs ZnO) de óxido de zinc en componentes morfológicos y el rendimiento de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) en condiciones de campo abierto. Los nanomateriales se prepararon a concentraciones de 0, 25, 50, 75, 100 y 125 mg de Zn/kg de suelo, utilizando suelo calcáreo con deficiencias de zinc para el crecimiento de las plantas. Durante el ciclo productivo se determinó el diámetro de tallo, la altura de la planta, y en la cosecha se cuantificó el rendimiento de grano por planta. Los resultados revelaron que la fuente de variación tratamientos influyo significativamente ($p \leq 0.05$) en las variables de respuesta agronómica del cultivo, para la fuente de variación bloques no se presentó diferencia significativa. Además, la altura de planta a una concentración de 75 mg de Zn/kg de suelo con ambas fuentes de Zn superó al control en 17.55 y 18.07%, respectivamente. Para el diámetro de tallo, se puede observar que todas las concentraciones con las dos fuentes de Zn presentaron un mejor desarrollo que el testigo (control). El rendimiento de granos en g/planta presentó un incrementó lineal al aumentar la concentración en ambas fuentes de Zn (NPs ZnO y GNPs ZnO), a 125 mg Zn/kg suelo se obtuvieron incrementos del 33.71 y 32.30 %, en comparación con el control.

Palabras clave: Nanomateriales, nanotecnología, zinc, rendimiento.

1. INTRODUCCIÓN

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 agrícola (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).

En este contexto, dentro de los métodos agronómicos para la biofortificación, la aplicación de nanomateriales para la nutrición de cultivos es un método que representa una oportunidad para mejorar la concentración de micronutrientes de interés alimentario en

los cultivos (Preciado-Rangel et al., 2022). No obstante, la mayoría de los estudios de fertilización con nanopartículas se ha realizado para mejorar las respuestas agronómicas y antioxidantes de hortalizas (Gupta et al., 2016). Por lo anterior, en este estudio se evaluó el impacto de nanopartículas metálicas (NPs ZnO) y orgánicas (GNPs ZnO) de óxido de zinc en componentes morfológicos y el rendimiento de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) en condiciones de campo abierto.

1.1 Hipótesis

Hi: La aplicación de nanomateriales de Zn (NPs ZnO y GNPs ZnO) a concentraciones de 25, 50, 75, 100 y 125 mg de Zn/kg suelo, modificará las respuestas morfológicas y productivas en *Sorghum bicolor* L. Moench.

Ho: La aplicación de nanomateriales de Zn (NPs ZnO y GNPs ZnO) a concentraciones de 25, 50, 75, 100 y 125 mg de Zn/kg suelo, no modificará las respuestas morfológicas y productivas en *Sorghum bicolor* L. Moench.

1.2 Objetivo

Evaluar el impacto de nanomateriales de Zn (NPs ZnO y GNPs ZnO) a concentraciones de 25, 50, 75, 100 y 125 mg de Zn/kg suelo, sobre las respuestas morfológicas y productivas en *Sorghum bicolor* L. Moench.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El Zinc en la nutrición de plantas

El elemento Zinc (Zn) actúa como componente metálico de varias enzimas como cofactor estructural y participa en la síntesis de proteínas, carbohidratos y ácidos nucleicos, influye en la biosíntesis de clorofila y producción de energía, también beneficia el metabolismo de proteínas, fosfatos y lípidos (Tymoszuk y Worjnarowicz, 2020). El Zn es un compuesto esencial de miles de proteínas en las plantas, aunque es tóxico en exceso, suele ser el segundo metal de transición más abundante en los organismos después del hierro (Fe) y el único metal representado en las seis clases de enzimas (Broadley et al., 2007).

El Zn pertenece a los micronutrientes que son esenciales para las plantas, al incorporarse a las enzimas asociadas con la proteosíntesis y los procesos energéticos, el Zn es necesario para mantener la integridad de las biomembranas y también el desarrollo de semillas y órganos vegetativos (Sturivoka et al., 2018). Las nanopartículas de óxido de zinc (NPs ZnO) son nanomateriales de óxido metálico y un compuesto inorgánico valioso y versátil debido a sus características físicas y químicas únicas, según varios estudios las NPs ZnO tiene la capacidad de aumentar la producción de cultivos alimentarios, la diversidad y promover un crecimiento saludable (Qing et al., 2023).

Los efectos de las NPs ZnO puede variar según la fase en desarrollo, actuando en el crecimiento y el metabolismo de la planta, estas nanopartículas pueden funcionar como fertilizantes que pueden impulsar el crecimiento y el rendimiento de los cultivos alimentarios (Gaubá et al., 2023). Se utilizan nanofertilizantes en base a nanopartículas de óxido de zinc, este tipo de fertilizante juega un papel importante en la agricultura, el nanofertilizante es un nutriente para plantas que es más que un fertilizante por que proporciona nutrientes para la planta también mejora el suelo a un estado orgánico sin los factores nocivos de los fertilizantes químicos (Sidra et al., 2014).

El elemento Zn es un micronutriente que las plantas necesitan en una cantidad pequeña, pero la disponibilidad de este nutriente para las plantas es muy inferior y es un problema real que se debe resolver (Narayanamma et al., 2007). La deficiencia de este micronutriente causa varios problemas en la planta, como una actividad enzimática reducida, un crecimiento físico anormal y un metabolismo alterado (Baybordy, 2006). El Zn es un nutriente con movilidad variable que se retransloca en mayor medida cuando se encuentra en suministros adecuados para la planta, cuando las plantas tienen un suministro de zinc bajo a adecuado suele ser la concentración en tejido en crecimiento, en el tejido maduro, esto para raíces, brotes vegetativos y tejidos reproductivos (Lognecker., 1993).

El elemento Zn es fundamental para la función de las auxinas y el ácido indolacético, también beneficia el funcionamiento de la clorofila y para una mejor producción de carbohidratos para la planta, también ayuda al metabolismo de las plantas durante el estrés oxidativo (Sheikh et al., 2009). El Zn es importante porque su deficiencia influye negativamente en las funciones reproductivas de la planta y el desarrollo del polen, induce a clorosis en la planta, reduce el área foliar y un crecimiento anormal de la planta, lo que hace al elemento Zn importante para la nutrición y desarrollo de la planta, lo que requiere aportaciones foliares o en el suelo (Sturikova et al., 2018).

El Zn está involucrado en numerosas reacciones enzimáticas en proceso como la fotosíntesis, transporte de electrones, activación del ácido indolacético, entre otros procesos fisiológicos de las plantas. El Zn es importante en la regulación del crecimiento vegetal y participa como activador de numerosas enzimas e interviene en la síntesis de proteínas, la deficiencia de este elemento causa clorosis en las hojas nuevas y reducción del crecimiento del tejido, al igual que reduce el peso y tamaño de los frutos, y altera la formación de granos y semillas (Molina, 2002).

El Zn es un micronutriente esencial en el metabolismo general forma parte fundamental en más de 300 enzimas e interviene en la fotosíntesis, la replicación y transcripción de ADN, la reproducción de auxinas y la integridad de la membrana celular. Se requiere

cantidades suficientes de este micronutriente para su crecimiento y desarrollo óptimo de las plantas (Alloway, 2008). Las plantas requieren cantidades muy pequeñas del elemento Zn al ser un micronutriente estos mismos se requieren en la planta en cantidades pequeñas y necesarias, en comparación con los macronutrientes que son en mayores cantidades, la deficiencia de Zn puede causar muchos problemas en las plantas como un crecimiento anormal, actividad enzimática reducida, entre otros (Sheykh et al., 2019).

El Zn es un elemento de transición que no está sujeto a cambios de valencia, se presenta en las plantas solamente como ion Zn^{++} . El elemento funciona como ion divalente en metaloenzimas las cuales ligan las enzimas y corresponden a sustratos, el Zn forma complejos tetrahídricos con N y O, ligados con S en una variedad de compuestos orgánicos (Kirkby y Romheld, 2008). La eficiencia de la fertilización foliar del micronutriente Zn en cítricos ha sido demostrada como eficiente, siempre que se realicen aplicaciones en cada brotación, el Zn tiene efectos indirectos sobre la calidad de la fruta y su acción varía de acuerdo al tenor foliar de otros nutrientes, consideran al Zn como el elemento más limitante para la producción (Rodríguez et al., 2005). La alta productividad de los cultivos puede ser alcanzada a partir de un adecuado estado nutricional de la planta, sobre todo en nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal como el Zn, Cu, Fe y Mg, estos nutrientes son conocidos como micronutrientes ya que son requeridos por las plantas en pequeñas cantidades, los suelos agrícolas suelen tener deficiencias de estos elementos, lo que suma la dificultad que presentan las plantas para absorberlos del suelo, lo que no permite un desarrollo óptimo de los cultivos (Rodríguez et al., 2014).

2.2 Nanomateriales en la agricultura

Las nanopartículas (NPs) tienen una gran capacidad para proteger las plantas debido a sus características esenciales, la aplicación de NPs en la agricultura se emplea en fertilizantes y pesticidas nanoencapsulados (Vishnu et al., 2021). Las nanopartículas que se emplea en la agricultura varían en tamaño de 1 a 100 nm, son comparativamente más seguros y efectivos que los fertilizantes convencionales, su aplicación como

fertilizante está ganando popularidad e investigación en el área científica (Rehmanullah et al., 2020). Actualmente existen muchas preocupaciones dentro de sector agrícola, lo principal es la reducción de la productividad de las plantas debido a diversos factores ambientales, por lo que es necesario la innovación continua de las tecnologías existente para una agricultura sostenible por lo que la nanotecnología es una de las más prometedoras y tiene un gran potencial de desarrollo para la agricultura (Liu et al., 2022).

Los fertilizantes tienen la función más importante dentro de la agricultura, pero su uso intensivo provoca la salinización de los suelos y para remediarlo se buscan soluciones para disminuir estos daños por su uso, los nanofertilizantes son una solución ya que pueden tener una rápida captación de los nutrientes del suelo por la planta, al aumentar la eficiencia del intercambio simbiótico entre los nutrientes del suelo y el sistema radicular de la planta, ayudando a obtener un mayor rendimiento de los cultivos (Rameshaiah y Pallavi, 2015). La aplicación de nanotecnología en la agricultura puede mejorar significativamente la eficiencia de los insumos agrícolas, ofrece una forma importante de mantener el desarrollo sostenible de los agroecosistemas a través de las nanopartículas (Raghvendra et al., 2021). La aplicación agronómica de la nanotecnología en las plantas tiene el potencial de alterar los sistemas convencionales de producción de plantas, lo que permite la liberación controlada de agroquímicos y el suministro específico de biomoléculas (Peng et al., 2021).

Los productos nanoderivados para uso agrícola juegan un papel vital en la mejora del crecimiento de las plantas y la productividad de los cultivos, las nanopartículas tienen cualidades como un tamaño compacto, fácil de transportar, fácil manejo, almacenamiento prolongado y alta eficiencia, lo que hace una opción viable para los agricultores en comparación con los productos químicos y las técnicas convencionales (Ragvendra et al., 2020). La nanotecnología se está convirtiendo en una tecnología revolucionaria y emergente en el sector agrícola, promete la entrega inteligente de nanofertilizantes que tienen el potencial de completar las tecnologías actuales (Hupenyo et al., 2022). Las investigaciones sobre aplicaciones de la nanotecnología en la agricultura buscan soluciones, como la sostenibilidad y productividad. Los nanomateriales tienen como

objetivo reducir la cantidad de productos químicos y minimizar la pérdida de nutrientes en la fertilización (Parisi et al., 2014).

El uso de fertilizantes químicos en la agricultura intensiva tradicional provoca contaminación del suelo, agua y plantas, dañando los ecosistemas, seres humanos y animales, por eso la nanotecnología procura encontrar métodos amigables para mejorar la eficiencia y la sustentabilidad de las prácticas agrícolas modernas (Grillo et al., 2016). Esta tecnología también está orientada a usar menos agroquímicos sintéticos y a reducir la generación de residuos contaminantes, buscando incrementar mejores crecimientos y un mayor rendimiento de los cultivos (Servin et al., 2015). En el sector agrícola, el uso de nanopartículas diseñadas (NP) ha sido aclamado como el próximo gran avance para mantener y aumentar la productividad de los cultivos, se hace énfasis en que las ENP pueden impulsar el crecimiento vegetativo, el desarrollo de las hojas y el establecimiento de semillas también ayuda a reducir los efectos del estrés biótico y abiótico (Piyush et al., 2023).

Las nanopartículas diseñadas han demostrado actividad en la supresión de enfermedades de las plantas, son los metaloides, los óxidos metálicos, los no metales y los nanomateriales de carbono, estos nanomateriales se han integrado en las estrategias de manejo de enfermedades como bactericidas/fungicidas y como nanofertilizantes para mejorar la calidad de la planta (Wade et al., 2018). La aplicación de NPs ZnO demuestran tener efectos positivos sobre parámetros nutricionales y fisiológicos en diversos cultivos (Rizwan et al., 2018). Su aplicación de manera foliar minimizan el uso de fertilizantes químicos, aumentan la eficiencia y una mejor disponibilidad de nutrientes en la planta (Nandhini et al., 2019).

Las NPs debido a su diminuto tamaño teniendo también alta relación área superficie/volumen, en los últimos años las ZnO NP han sido objeto de extensos estudios debido a sus buenas cualidades entre ellas es la biocompatibilidad, su interacción con el medio ambiente, síntesis simple, gran fotosensibilidad entre otras cualidades, puede revolucionar la agricultura actual (Gaubá et al., 2023). La nanotecnología brinda un gran

desarrollo en varios campos por sus sobresalientes características, una de sus aplicaciones más importantes es para su aplicación en las plantas ya que proporciona efectos benéficos en las plantas y el suelo al funcionar como fertilizante para mejorar el crecimiento y la productividad de los cultivos, también funcionan como biosensores para monitorear la calidad del suelo y salud de las plantas (Thounaojam et al., 2021).

Las nanopartículas pueden ser una herramienta para cumplir con los requerimientos de Zn, ayudando en la rápida penetración del fertilizante en la semilla, también se informa que ayuda al funcionamiento normal de la clorofila y para una mejor producción de carbohidratos para la planta (Raskar et al., 2014). La aplicación de la nanotecnología en la agricultura puede promover una agricultura sostenible mediante el suministro de fertilizantes, herbicidas y pesticidas de liberación lenta o controlada, los nanofertilizantes ayudan a la provisión de los nutrientes esenciales al suelo de forma continua, debido a su liberación gradual promueven una mejor entrega de nutrientes a las plantas que acelera más la germinación, un crecimiento rápido y un alto nivel nutricional (Lateef et al., 2016).

La agricultura actual se enfrenta a una amplia gama de desafíos como el estancamiento en el rendimiento de los cultivos, la baja eficiencia de los fertilizantes, disminución en la materia orgánica del suelo, carencia de agua, entre otros aspectos la nanotecnología propone su uso para poder hacer frente a estos problemas actuales (Echegoyen y Nerín, 2013). Diversos experimentos se han realizado para conocer el tamaño óptimo, forma y concentración de las NPs para que sean aplicadas a las plantas tratando de mejorar la penetración y translocación vascular por los haces vasculares del xilema y el floema, las NPs se pueden penetrar los tejidos vegetales cuando se aplican sobre las hojas de manera foliar (Wang y Tarafdar, 2013).

Las nanopartículas (NP) de cobre y sus componentes son conocidos desde tiempos antiguos por su habilidad para inhibir hongos y han sido usados en la agricultura como fungicidas, algicidas, pesticidas y herbicidas. Debido al constante incremento de la resistencia de las bacterias a los fármacos, también aumento la producción de NP de Cu

antibacteriales y fúngicas, también son usadas como aditivo para aumentar la vida de anaquel, debido a esto se ha incrementado la preocupación acerca de la toxicidad y biocumulación de las nanopartículas (Gómez et al., 2016).

2.3 Impacto de nanomateriales en la agricultura

Los nanofertilizantes son de diferente forma, tamaño, propiedades físicas y modificaciones superficiales, estos abren una nueva era prometedora en el campo de la mejora de cultivos, se ha demostrado experimentalmente que los nanofertilizantes de diferentes metales y óxidos metálicos junto con los no metales (carbono y silicio) y polímeros orgánicos favorecen el crecimiento y desarrollo de las plantas (Mathur et al., 2023).

La aplicación de nanofertilizantes permite la liberación de nutrientes al suelo de forma gradual y controlada, en comparación a los fertilizantes convencionales los nanofertilizantes reducen la tasa de liberación de nutrientes evitando así la eutrofización y contaminación de los recursos hídricos, el uso de nanofertilizantes mejora el rendimiento y la calidad de los cultivos con una mayor eficiencia en el uso de nutrientes al tiempo que reduce los costos de producción lo que contribuye a la sustentabilidad agrícola (Bratovcic et al., 2021).

La aplicación foliar de nanopartículas de Ca mejoro el estado nutricional foliar, el crecimiento y el rendimiento en el cultivo de canola. La aplicación foliar con nanofertilizantes puede ser una estrategia ideal para aumentar la productividad agrícola, las Ca-NP pueden también aliviar los efectos adversos del estrés por sequía en el crecimiento de la Canola (Ayyaz et al., 2022). Actualmente se ha propuesto el uso biomasal residual para la obtención de bioestimulante y nanopartículas biogénicas para cultivos, ya que diferentes investigaciones han demostrado que estos nanofertilizantes de base biológica tiene potencial de contrarrestar algunos de los problemas que aquejan a la agricultura actual (Tolisano y Buono, 2023).

Se realizó un estudio aplicando nanopartículas de plata sobre la germinación y crecimiento de plantas de arroz (*Oryza zativa L.*), las NPs contaban con tamaños de 20-150 nm aplicando en diferentes concentraciones 0-1000mg L⁻¹, dieron como resultado que la germinación de la semilla y el crecimiento de plántula disminuyó continuamente con el tamaño y concentraciones de nanopartículas, el resultado de análisis de tejido demostró que la aplicación de 20 nm se concentró en la raíz de la semilla (Thuesombat et al., 2014).

Las NPs se pueden aplicar foliarmente y mediante el sistema de riego, pero su uso puede provocar fitotoxicidad, afectando el suelo y el agua por bioacumulación del material. La nanotoxicidad es un área con poco estudio, pero su uso está relacionado con el nanoproducto, su estructura química, dosis aplicada, tamaño de la partícula y su área superficial (Aslani et al., 2014). Las NPs diseñadas se considera una solución para la agricultura como fertilizante, potenciador del crecimiento y siendo también un pesticida, varios estudios demuestran que la aplicación de concentraciones no tóxicas benefician la germinación de semilla, mejoran el crecimiento de las plantas y aumentan el rendimiento, las NPs se pueden usar para proteger las plantas de los impactos ambientales como el estrés por sal o sequía, disminuir la acumulación y la toxicidad de metales pesados en el suelo (Landa, 2021).

El uso de nanofertilizantes es muy prometedor en la agricultura, los materiales sirven como protectores de plantas, potenciadores de la nutrición y mitigadores de los efectos del estrés biótico y abiótico debido a sus cualidades dependiendo el tamaño, alta relación superficie-volumen y propiedades ópticas únicas, las NPs de óxido metálico se han utilizado de manera eficaz en la agricultura debido a sus propiedades fisicoquímicas y la capacidad de mejorar el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Ndou et al., 2023). La aplicación de nanopartículas se ha convertido en un gran impulso para el manejo de enfermedades en la agricultura, se realizó un tratamiento con aplicación de NPs y mejoró significativamente la germinación de semillas de Mijo Perla, con incrementos en el vigor, la altura de planta, peso fresco y seco de la plántula. También se encontró que el contenido de Zn en las plántulas con NPs era mayor en comparación con las plantas

comunes, se aplicó NPs ZnO como pulverización foliar y dio como resultado una reducción del 35% en el índice de Mildiú Velloso (Nandhini et al., 2019).

Los resultados del experimento en maíz mostraron que las NPs ZnO pueden mejorar el crecimiento de las plantas de maíz, los parámetros de la planta, como altura de la planta, la longitud de raíz y el peso de materia seca, mejoraron gracias a la aplicación de nanopartículas de óxido de Zn (Adhikari et al., 2015). Los nanomateriales tienen muchas propiedades físicas y químicas excelentes, debido a estas características se pueden aplicar como antibacteriales o insecticidas y se pueden usar directamente como componentes activos de pesticidas, como las nanopartículas de plata controlan el tizón temprano del tomate aumentando el peso fresco y el contenido de clorofila de los tomates hasta un 32% comparado con un testigo sin aplicación de NPs (Yin et al., 2023).

Las plantas requieren Zn para el metabolismo de los carbohidratos y la expresión génica en respuesta al estrés ambiental, las NPs ZnO se aplican como nanofertilizantes y agroquímicos para mejorar la producción de cultivos, registraron que la ventaja de los nanodominios en su liberación gradual de nutrientes benéficos fomenta el crecimiento y desarrollo de las plantas de manera más efectiva (Liu y Lal, 2015). La aplicación de NPs en el área de agricultura puede aumentar la productividad de los cultivos, también disminuye la pérdida de minerales y disminuye el uso de fertilizantes, el uso de NPs ZnO a través de síntesis verde la aplicación de estos nanofertilizantes mejoró un 37.5% la germinación de semillas de brócoli, 56.6% en la longitud de raíz, 16.6% en la longitud de los brotes, 41% en el peso de la plántula, 11.5% en el número de hojas, 17.1% en la altura de planta, 24.4% en área foliar, también se observó un aumento en la clorofila de un 50%, fenoles 67.4%, prolina 14.6% y azúcar con 36.2% (Awan et al., 2021).

La nanotecnología ofrece nuevas oportunidades para el desarrollo de nuevos materiales y estrategias que mejoren la producción, este estudio indica que las NPs ZnO brindan una dispersión prometedora de nanofertilizantes en la agricultura sostenible. Las NPs ZnO se aplicaron en el cultivo de lentejas beneficiando positivamente el rendimiento, el peso de mil semillas y el número de vainas por planta (Kolenčík et al., 2022).

La aplicación de NPs ZnO en la germinación y desarrollo de plántula de habanero tuvo efectos positivos por la aplicación en diferentes concentraciones de 100 y 200 ppm, presentándose un aumento en el vigor y la velocidad de emergencia de la plúmula en los primeros siete días (García-López et al., 2018). La aplicación de sulfato de zinc y nano-óxido de zinc sobre las plantas de romero, dieron como resultado que las bajas concentraciones de estos nanofertilizantes aumentaron significativamente la clorofila y los carotenoides en comparación con el testigo, mientras que las altas concentraciones disminuyeron estos parámetros, la actividad antioxidante aumentó, la prolina, la peroxidación de lípidos de membranas, el azúcar soluble y los compuestos fenólicos aumentaron en las plantas con las aplicaciones (Mohsenzadeh y Moosavian, 2017).

Diversas investigaciones dan como resultado que el efecto de los nanofertilizantes y promotores de crecimiento provocado por las NPs está relacionado con su concentración, tamaño y propiedades inherentes del elemento involucrado, también la función fisiológica y bioquímica que desempeña la planta (Engates y Shipley, 2011). Las nanopartículas NPs ZnO por sus propiedades físicas y antimicrobianas tienen efectos positivos en las plantas, varios estudios sugieren que tienen la capacidad de mejorar el crecimiento en diferentes especies de plantas, su aplicación beneficia la germinación en las semillas en bajas concentraciones, pero en altas concentraciones tiene un efecto negativo (Raskar y Laware, 2014).

Se ha demostrado que los nanofertilizantes incrementan el uso eficiente de los nutrientes, reducen su toxicidad en el suelo al aplicarse en cantidades muy pequeñas, minimizan el efecto negativo de la sobredosis, bajan la frecuencia de aplicación de los fertilizantes y en consecuencia el costo de estos importantes insumos (Amirnia et al., 2014).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Material genético

La línea experimental de sorgo utilizada fue de grano blanco, y pertenece al programa de Mejoramiento de Sorgo del Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas (CCDTS) de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. El cultivo se estableció en el ciclo agrícola primavera-verano 2022, en el Campo Experimental Bajío UAAAN en Saltillo, Coahuila localizado a 25° 21' 29" Latitud N, 101° 02' 21" Longitud O, a una altitud de 1742 m s.n.m.

3.2 Fuentes de Zn

Las nanopartículas metálicas de óxido de Zn (NPs ZnO) se compraron en Sigma-Aldrich (San Luis, Misuri, USA), mientras que las nanopartículas orgánicas de ZnO (GNPs ZnO) se sintetizaron por química verde (Matinise et al., 2017).

3.3 Condiciones de crecimiento y diseño experimental de siembra

El cultivo se estableció bajo un diseño de bloques completamente al azar, con un arreglo de surcos de 4 m de largo, 0.80 m entre surcos, y 1 m entre calles, con una población de 16 plantas por m lineal y tres repeticiones para cada tratamiento. El suelo se fertilizó con 100 de N kg/ha en forma de urea prilada (46-0-0), 55 kg/ha de P en forma de fosfato diamónico DAP (18-46-0), y 110 kg/ha de K con cloruro de potasio (0-0-60). Posteriormente, las aplicaciones de Zn al suelo se realizaron como polvo seco con las diferentes fuentes de Zn (NPs ZnO y GNPs ZnO), a concentraciones de 25, 50, 75, 100 y 125 mg de Zn/kg suelo, simulando la concentración promedio de Zn en suelos que está en el rango de 10 a 100 mg de Zn/ha de suelo (Hurdebise et al., 2015).

3.4 Evaluación de componentes agronómicos

Los parámetros agronómicos que se evaluaron fueron los siguientes: el rendimiento de grano en gramos por planta (RGPP), para ello se seleccionaron cinco plantas representativas de cada parcela, las cuales se trillaron de forma individual, el grano se pesó y el valor se informó en promedio en gramos (g) por planta; además del diámetro de tallo y la altura de planta, ambos en cm.

3.5 Análisis estadístico

Para el análisis de datos se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar, con tres repeticiones, para un total de 36 parcelas experimentales. Los resultados se analizaron con un ANOVA en el paquete estadístico SAS versión 9.1, con una prueba comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$). Los resultados se informaron como valores medios de tres repeticiones \pm desviación estándar.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados del ANOVA

Los resultados indican que la fuente de variación tratamientos influyo significativamente ($p \leq 0.05$) en las variables de respuesta agronómica del cultivo de sorgo (Cuadro 1), para la fuente de variación bloques no se presentó diferencia significativa. Estos resultados permiten conocer como la influencia del Zn a diferentes concentraciones puede afectar en las respuestas agronómicas de la planta. En la comparación de medias se discutirán a detalle los efectos que ocasionaron los nanomateriales a base de Zn.

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza de parámetros agronómicos en Sorgo por la aplicación de dos nanomateriales a base de Zn.

FV	GL	Altura de planta (cm)	Diámetro de tallo (cm)	RGPP
Tratamientos	10	187.20*	261.60*	1811.21*
Bloques	10	362.51	154.78	1544.39
Error	55	0.16	2.20	618.02
CV		31.15	24.16	47.11

*, ** Significativo al 0.05 y 0.01 de probabilidad respectivamente; FV= Fuentes de variación; GL= Grados de libertad; CV= Coeficiente de variación; RGPP= Rendimiento de grano en gramos por planta.

4.2 Respuesta de la altura de planta

En la Figura 1, se puede observar que la altura de planta fue superior en todos los tratamientos dónde se aplicó Zn en comparación con el control. Específicamente, el mayor desarrollo de la altura de planta se encontró en ambas fuentes de Zn (NPs ZnO y GNPs ZnO) a la concentración de 75 mg de Zn/kg de suelo, superando al control en 17.55 y 18.07%, respectivamente. Las dos fuentes de Zn en todas las concentraciones fueron estadísticamente iguales, lo que sugiere que la respuesta agronómica del cultivo fue similar para cada concentración y fuente de Zn.

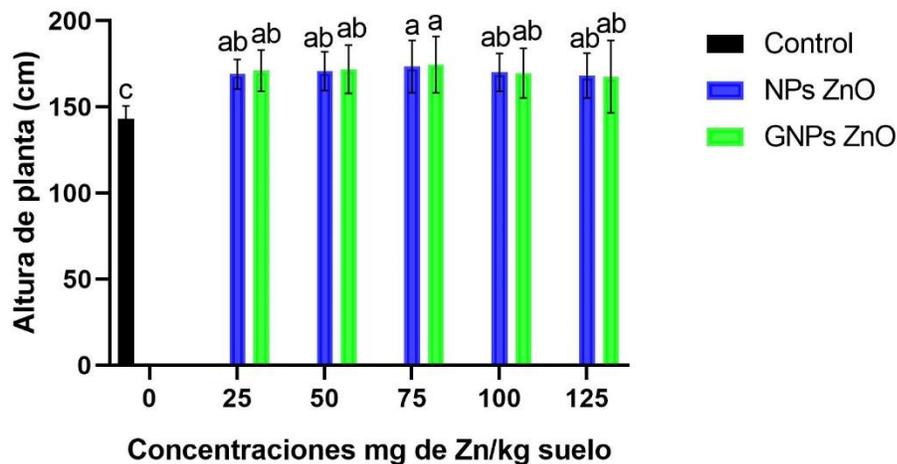


Figura 1. Altura de plantas de sorgo por la aplicación de NPs ZnO y GNPs ZnO a concentraciones de 0, 25, 50, 75, 100 y 125 mg Zn/kg suelo.

4.3 Diámetro de tallo y rendimiento

En cuanto al diámetro de tallo (Figura 2a), se puede observar que todas las concentraciones con las dos fuentes de Zn, presentaron un mejor desarrollo que el testigo (control), sin embargo, todas las concentraciones fueron estadísticamente iguales. Para el RGPP (Figura 2b), se presentó un incremento lineal al aumentar la concentración en ambas fuentes de Zn (NPs ZnO y GNPs ZnO), en comparación con el control, el mayor rendimiento se puede observar a 125 mg Zn/kg suelo con incrementos que van del 33.71 y 32.30 %, respectivamente.

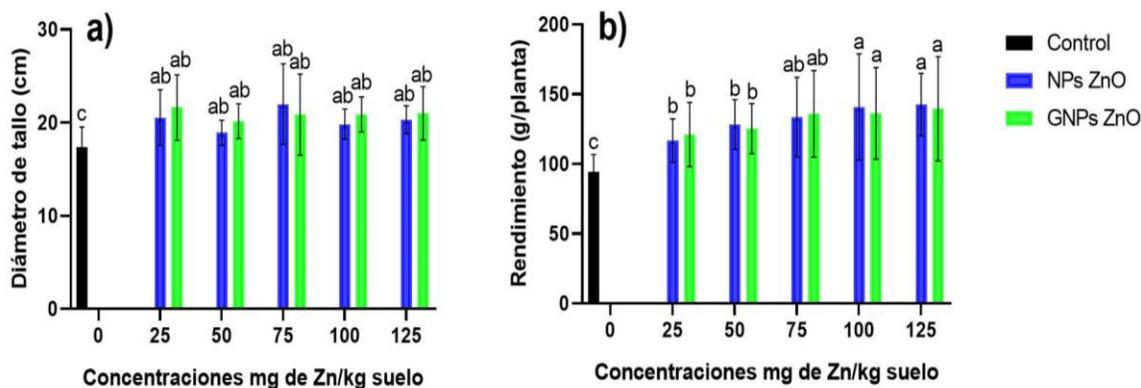


Figura 2. Diámetro de tallo (a) y rendimiento de grano (b) en plantas de sorgo por la aplicación de NPs ZnO y GNPs ZnO a concentraciones de 0, 25, 50, 75, 100 y 125 mg Zn/kg suelo.

Los resultados sugieren que la aplicación de Zn con ambos nanomateriales, permito un mejor crecimiento de las plantas, lo que probablemente se debió a la absorción de Zn en los tejidos de la planta, lo que mejoró respuestas fisiológicas que ayudaron a un mejor comportamiento agronómico. Según García-Gómez et al. (2017), el Zn extraíble con DTPA-TEA del suelo dónde se estableció el cultivo es deficiente para el crecimiento y desarrollo de las plantas en suelos calcáreos (0.11 mg kg^{-1}), esto explica por qué las plantas del control presentaron un menor desarrollo morfológico y bajos rendimientos. El zinc (Zn) juega un papel importante en el funcionamiento de las plantas, como regulador de auxinas mediante la síntesis de triptófano y como cofactor en las enzimas redox superóxido dismutasa y deshidrogenasas, por esta razón, las deficiencias de Zn durante el desarrollo de la planta pueden afectar en gran medida su potencial productivo (Narendhran et al., 2016).

Los fertilizantes nanométricos permiten mejorar la eficiencia de nutrientes por parte de las plantas debido a su pequeño tamaño, mayor área de superficie y liberación gradual de sus formas iónicas (Rawat et al., 2018). Por ejemplo, la solubilidad del ZnSO_4 (aproximadamente $2650 \mu\text{mol L}^{-1}$), que es mucho mayor que la solubilidad que tienen las NPs ZnO ($786 \mu\text{mol L}^{-1}$), que presentan disponibilidad lenta y gradual del Zn disuelto (García-López et al., 2019), esto permite que los nanomateriales de Zn estén un mayor

tiempo disponibles para la planta, lo cual al termino del ciclo productivo se puede presentar en mejorar del rendimiento, como lo fue en este estudio.

Un estudio realizado en arboles de granada (*Punica granatum* cv. Ardestani) mostró que la fertilización con cantidades relativamente bajas de nano-fertilizantes de Zn y B incremento el rendimiento y la calidad de los frutos (Davarpanah *et al.*, 2016). Hallazgos similares se han informado, demostrando un aumento en el crecimiento de plántulas cultivadas bajo NPs ZnO (Pavani *et al.*, 2014). De tal forma que, el efecto de la aplicación de nanomateriales a base de Zn como fuente de fertilizante en plantas, parece estar determinado por la concentración aplicada, la disolución de sus formas iónicas, así como la absorción y transporte del elemento activo y su acumulación en los tejidos de las plantas (Wan *et al.*, 2020).

5. CONCLUSIONES

La aplicación de NPs ZnO y GNPs ZnO mejoró notablemente el crecimiento de las plantas (altura de planta y diámetro de tallo), esto permite concluir que las plantas que son cultivadas en suelos con deficiencias de Zn pueden verse afectadas en su rendimiento productivo.

El rendimiento se incrementó al aumentar la concentración en ambas fuentes de Zn en comparación con el control, la mayor cantidad de granos se obtuvo con una concentración de 125 mg Zn/kg suelo con incrementos que van del 33.71 y 32.30 %, respectivamente.

Los dos nanomateriales de Zn evaluados permitieron una mejora en las variables de respuesta, por ello, se recomienda su uso en la producción de cultivos básicos.

6. LITERATURA CITADA

- Adhikari, T., Kundu, S., Biswas, A.K., Tarafdar, J.C., and Subba Rao, A. 2015. Characterization of zinc oxide nano particles and their effect on growth of maize (*Zea mays L.*) plant. *Journal of Plant Nutrition*, 38(10), 1505-1515.
- Alloway, B J. 2008. Zinc in soils and crop nutrition.
- Almendros, P., Obrador, A., Alvarez, J.M., Gonzalez, D., y Machado, R. 2014. 2014-1. El Caso Del Zinc Biofortificación De Cereales Con Micronutrientes (pp. 686–688). *Nutrición y Sanidad Vegetal*.
- Amirnia, R., Bayat, M., and Tajbakhsh, M. 2014. Effects of nano fertilizer application and maternal corm weight on flowering at some saffron (*Crocus sativus L.*) ecotypes. *Turkish Journal of Field Crops*, 19(2).
- Aslani, F., Bagheri, S., Muhd Julkapli, N., Juraimi, A.S., Hashemi, F.S.G., and Baghdadi, A. 2014. Effects of engineered nanomaterials on plants growth: an overview. *The Scientific World Journal*, 2014.
- Awan, S., Shahzadi, K., Javad, S., Tariq, A., Ahmad, A., and Ilyas, S. 2021. A preliminary study of influence of zinc oxide nanoparticles on growth parameters of *Brassica oleracea* var *italica*. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 20(1), 18-24.
- Ayyaz, A., Fang, R., Ma, J., Hannan, F., Huang, Q., Sun, Y., and Farooq, M. A. 2022. Calcium nanoparticles (Ca-NPs) improve drought stress tolerance in *Brassica napus* by modulating the photosystem II, nutrient acquisition and antioxidant performance. *NanoImpact*, 28, 100423.
- Baybordi, A. 2006. Zinc in soils and crop nutrition.
- Bratovcic, A., Hikal, W.M., Said-Al Ahl, H.A., Tkachenko, K.G., Baeshen, R.S., Sabra, A.S., and Sany, H. 2021. Nanopesticides and nanofertilizers and agricultural development: Scopes, advances and applications. *Open Journal of Ecology*, 11(4), 301-316.
- Broadley, M.R., White, P.J., Hammond, J.P., Zelko, I., and Lux, A. 2007. Zinc in plants. *New phytologist*, 173(4), 677-702.
- Echegoyen, Y., and Nerín, C. 2013. Nanoparticle release from nano-silver antimicrobial food containers. *Food and chemical toxicology*, 62.
- Elmer, W., Ma, C., and White, J. 2018. Nanoparticles for plant disease management. *Current Opinion in Environmental Science and Health*, 6, 66-70.

- Engates, K.E., and Shipley, H.J. 2011. Adsorption of Pb, Cd, Cu, Zn, and Ni to titanium dioxide nanoparticles: effect of particle size, solid concentration, and exhaustion. *Environmental Science and Pollution Research*, 18, 386-395.
- García-Gómez, C., Obrador, A., González, D., Babín, M., and Fernández, M.D. 2017. Comparative effect of ZnO NPs, ZnO bulk and ZnSO₄ in the antioxidant defences of two plant species growing in two agricultural soils under greenhouse conditions. *Science of the Total Environment*, 589, 11-24.
- García-López, J. I., Zavala-García, F., Olivares-Saénz, E., Lira-Saldivar, R. H., Barriga-Castro, E. D., Ruiz-Torres, N. A., Ramos-Cortez, E., Vázquez-Alvarado, R., & Niño-Medina, G. (2018). Zinc Oxide nanoparticles boosts phenolic compounds and antioxidant activity of capsicum annum l. during germination. *Agronomy*, 8(10).
- García-López, J.I., Zavala-García, F., Olivares-Sáenz, E., Lira-Saldivar, R.H., Díaz Barriga-Castro, E., Ruiz-Torres, N.A., and Niño-Medina, G. 2018. Zinc oxide nanoparticles boosts phenolic compounds and antioxidant activity of *Capsicum annum L.* during germination. *Agronomy*, 8(10), 215.
- Gaub, A., Hari, S.K., Ramamoorthy, V., Vellasamy, S., Govindan, G., and Arasu, M.V. 2023. The versatility of green synthesized zinc oxide nanoparticles in sustainable agriculture: A review on metal-microbe interaction that rewards agriculture. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 102023.
- Gómez, C.A.T., De la Rosa Álvarez, M.G., Castañeda, M.C.G., and Melo, D.F.A. 2016. Efecto de nanomateriales metálicos en la salud de plantas en diferentes estadios de crecimiento. *jóvenes en la ciencia*, 2(1), 1556-1560.
- Grillo, R Abhilash, P.C. y Fraceto, L.F 2016. Nanotechnology applied to bio-encapsulation of pesticides. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 16: 1231:1234.
- Gupta, N., Ram, H., and Kumar, B. 2016. Mechanism of zinc absorption in plants: uptake, transport, translocation and accumulation. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 15(1), 89–109.
- Hurdebise, Q., Tarayre, C., Fischer, C., Colinet, G., Hiligsmann, S., and Delvigne, F. 2015. Determination of zinc, cadmium and lead bioavailability in contaminated soils at the single-cell level by a combination of whole-cell biosensors and flow cytometry. *Sensors*, 15(4), 8981-8999.
- Kirkby, E. y Rodmheld, V. 2008b. Micronutrientes en la fisiología de las plantas: funciones, absorción y movilidad (segunda parte). *Informaciones Agronómicas* 69: p.9-13.
- Kolenčík, M., Ernst, D., Komár, M., Urík, M., Šebesta, M., Ďurišová, L., and Aydın, E. 2022. Effects of foliar application of ZnO nanoparticles on lentil production, stress level and nutritional seed quality under field conditions. *Nanomaterials*, 12(3), 310.

- Landa, P. 2021. Positive effects of metallic nanoparticles on plants: Overview of involved mechanisms. *Plant Physiology and Biochemistry*, 161, 12-24.
- Lateef, A., Nazir, R., Jamil, N., Alam, S., Shah, R., Khan, M.N., and Saleem, M. 2016. Synthesis and characterization of zeolite based nano-composite: An environment friendly slow release fertilizer. *Microporous and Mesoporous Materials*, 232, 174-183.
- Liu, L., Nian, H., and Lian, T. 2022. Plants and rhizospheric environment: Affected by zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs). A review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 185, 91-100.
- Liu, R., and Lal, R. 2015. Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Science of the total environment*, 514, 131-139.
- Longnecker, N.E., and Robson, A.D. 1993. Distribution and transport of zinc in plants. In *Zinc in Soils and Plants: Proceedings of the International Symposium on 'Zinc in Soils and Plants' held at The University of Western Australia, 27-28 September, 1993* (pp. 79-91). Springer Netherlands.
- Mathur, P., Chakraborty, R., Aftab, T., and Roy, S. 2023. Engineered nanoparticles in plant growth: Phytotoxicity concerns and the strategies for their attenuation. *Plant Physiology and Biochemistry*, 107721.
- Matinise, N., Fuku, X.G., Kaviyarasu, K., Mayedwa, N., and Maaza, M.J.A.S.S. 2017. ZnO nanoparticles via *Moringa oleifera* green synthesis: Physical properties and mechanism of formation. *Applied Surface Science*, 406, 339-347.
- Mohsenzadeh, S., and Moosavian, S.S. 2017. Zinc sulphate and nano-zinc oxide effects on some physiological parameters of *Rosmarinus officinalis*. *American Journal of Plant Sciences*, 8(11), 2635-2649.
- Mupambwa, H.A., Nciizah, A.D., Nyambo, P., Dube, E., Muchara, B., Fanadzo, M., and Hausiku, M.K. 2022. Potential Applications of Nanomaterials in Agronomy: An African Insight. In *Emerging Nanomaterials for Advanced Technologies* (pp. 581-600). Cham: Springer International Publishing.
- Nandhini, M., Rajini, S.B., Udayashankar, A.C., Niranjana, S.R., Lund, O.S., Shetty, H.S., and Prakash, H.S. 2019. Biofabricated zinc oxide nanoparticles as an eco-friendly alternative for growth promotion and management of downy mildew of pearl millet. *Crop Protection*, 121, 103-112.
- Narayanamma, M., Chiranjeevi, C.H., and Ahmed, S.R. 2007. Effect of foliar application of micronutrients on the growth, yield and nutrient content of cabbage (*Brassica oleracea L var. capitata*) in Andhra Pradesh.

- Narendhran, S., Rajiv, P., and Sivaraj, R. 2016. Influence of zinc oxide nanoparticles on growth of *Sesamum indicum* L. in zinc deficient soil. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 365-371.
- Ndou, N., Rakgotho, T., Nkuna, M., Doumbia, I.Z., Mulaudzi, T., and Ajayi, R.F. 2023. Green Synthesis of Iron Oxide (Hematite) Nanoparticles and Their Influence on *Sorghum bicolor* Growth under Drought Stress. *Plants*, 12(7), 1425.
- Parisi, C., Vigani, M., and Rodríguez-Cerezo, E. 2015. Agricultural nanotechnologies: what are the current possibilities?. *Nano Today*, 10(2), 124-127.
- Pavani, K., Divya, V., Veena, I., Aditya, M., and Devakinandan, G. 2014. Influence of bioengineered zinc nanoparticles and zinc metal on *Cicer arietinum* seedlings growth. *Asian J. Agric. Biol*, 2, 216-223.
- Preciado-Rangel, P., Valenzuela-García, A.A., Pérez-García, L.A., González-Salas, U., Ortiz-Díaz, S.A., Buendía-García, A., and Puente, E.O.R. 2022. Foliar biofortification with iron improves nutraceutical quality and antioxidant capacity in lettuce. *Terra Latinoamericana*, 40, 1–7.
- Rajput, V.D., Singh, A., Minkina, T., Rawat, S., Mandzhieva, S., Sushkova, S., and Upadhyay, S. K. 2021. Nano-enabled products: challenges and opportunities for sustainable agriculture. *Plants*, 10(12), 2727.
- Rameshaiah, G.N., Pallavi, J., and Shabnam, S. 2015. Nano fertilizers and nano sensors—an attempt for developing smart agriculture. *Int J Eng Res Gen Sci*, 3(1), 314-320.
- Ramírez, J.A., Betancourt-Galindo, R., Aguirre-Urbe, L.A., Cerna-Chávez, E., Sandoval-Rangel, A., Ángel, E.C.D., and Hernández-Juárez, A. 2021. Insecticidal effect of zinc oxide and titanium dioxide nanoparticles against *Bactericera cockerelli* Sulc.(Hemiptera: Triozidae) on tomato *Solanum lycopersicum*. *Agronomy*, 11(8), 1460.
- Raskar, S.V., and Laware, S.L. 2014. Effect of zinc oxide nanoparticles on cytology and seed germination in onion. *Int J Curr Microbiol App Sci*, 3(2), 467-473.
- Rawat, P.S., Kumar, R., Ram, P., and Pandey, P. 2018. Effect of nanoparticles on wheat seed germination and seedling growth. *International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering*, 12(1), 13-16.
- Rehmanullah, Muhammad, Z., Inayat, N., and Majeed, A. 2020. Application of nanoparticles in agriculture as fertilizers and pesticides: challenges and opportunities. *New Frontiers in Stress Management for Durable Agriculture*, 281-293.
- Rizwan, M.; Ali, S.; Ali, B.; Andrees, M.; Arshad, M.; Hussain, A.; Zia, R.M and Waris, A.A. 2018. Zinc and iron oxide nanoparticles improved the plant growth and reduced the oxidative stress and cadmium concentration in wheat. *Chemosphere*. 214(1):269-277.

- Rodríguez, V.A., Cabrera, B., Martínez, G.C., Chabbal, M.D., and Mazza, S.M. 2014. Foliar fertilization with zinc and manganese in Valencia late orange orchards. *Cultivos Tropicales*, 35(4), 100-105.
- Rodríguez, V.A.; Mazza, S.M.; Martínez, G.C. y Ferrero, A.R. Influencia de Zn y K en el tamaño del fruto de naranja valencia. *Rev. Bras. Frutic. Jaboticabal-SP*, 2005, vol. 27, no. 1, pp. 132-135.
- Sabir, S., Arshad, M., and Chaudhari, S.K. 2014. Zinc oxide nanoparticles for revolutionizing agriculture: synthesis and applications. *The Scientific World Journal*, 2014.
- Servin, A., Elmer, W., Mukherjee, A, De la Torre-Roche, R., Hamdi, H., White, J.C. y Dimkpa, C. 2015. A review of the use of engineered nanomaterials to suppress plant disease and enhance crop yield. *Journal of Nanoparticle Research*, 17: 1-21.
- Sheykh, B.N., Hasanzadeh, G.T.A., Baghestani, M.M., and Zand, B. 2009. Study the effect of zinc foliar application on the quantitative and qualitative yield of grain corn under water stress.
- SinghPe, R.P., Handa, R., and Manchanda, G. 2021. Nanoparticles in sustainable agriculture: An emerging opportunity. *Journal of Controlled Release*, 329, 1234-1248.
- Sturikova, H., Krystofova, O., Huska, D., and Adam, V. 2018. Zinc, zinc nanoparticles and plants. *Journal of hazardous materials*, 349, 101-110.
- Thounaojam, T.C., Meetei, T.T., Devi, Y.B., Panda, S.K., and Upadhyaya, H. 2021. Zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs): a promising nanoparticle in renovating plant science. *Acta Physiologiae Plantarum*, 43, 1-21.
- Thuesombat, P., Hannongbua, S., Akasit, S., and Chadchawan, S. 2014. Effect of silver nanoparticles on rice (*Oryza sativa L.*) seed germination and seedling growth. *Ecotoxicology and environmental safety*, 104.
- Tolisano, C., and Del Buono, D. 2023. Biobased: Biostimulants and biogenic nanoparticles enter the scene. *Science of The Total Environment*, 163912.
- Tymoszuk, A., and Wojnarowicz, J. 2020. Zinc oxide and zinc oxide nanoparticles impact on in vitro germination and seedling growth in *Allium cepa L.* *Materials*, 13(12), 2784.
- Wan, J., Wang, R., Bai, H., Wang, Y., and Xu, J. 2020. Comparative physiological and metabolomics analysis reveals that single-walled carbon nanohorns and ZnO nanoparticles affect salt tolerance in *Sophora alopecuroides*. *Environmental Science: Nano*, 7(10), 2968-2981.
- Wang, W.N., Tarafdar, J.C., and Biswas, P. 2013. Nanoparticle synthesis and delivery by an aerosol route for watermelon plant foliar uptake. *Journal of nanoparticle research*, 15, 1-13.

- Yin, J., Su, X., Yan, S., and Shen, J. 2023. Multifunctional Nanoparticles and Nanopesticides in Agricultural Application. *Nanomaterials*, 13(7), 1255.
- Zhou, X.Q., Hayat, Z., Zhang, D.D., Li, M.Y., Hu, S., Wu, Q., and Yuan, Y. 2023. Zinc Oxide Nanoparticles: Synthesis, Characterization, Modification, and Applications in Food and Agriculture. *Processes*, 11(4), 1193.