

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Contenido de Clorofila y Crecimiento de Plantas de Maíz (*Zea mays* L.) Tratadas con Nanopartículas de Óxido de Zinc

Por:

AARÓN FABIÁN CÁRDENAS HUERTA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México

MARZO, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN

Contenido de Clorofila y Crecimiento de Plantas de Maíz (*Zea mays* L.) Tratadas
con Nanopartículas de Óxido de Zinc

Por:

AARÓN FABIÁN CÁRDENAS HUERTA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dra. Norma Angelica Ruiz Torres
Asesor Principal



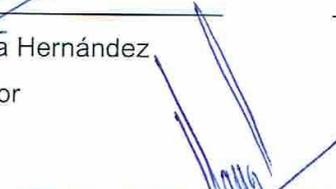
Dra. Ileana Vera Reyes
Asesor Principal Externo



Dra. Pilar Espitia Hernández
Coasesor



Lic. Úrsula Casar Belmares
Coasesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Marzo, 2025

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (Mi Alma Mater) por brindarme la oportunidad de pertenecer a esta gran universidad y por todo lo aprendido, por prepararme para conseguir mis metas. Grandes recuerdos vividos en esta institución que siempre llevaré presentes a donde quiera que vaya.

A mi familia gracias por su apoyo emocional y sus palabras de aliento han sido esenciales para que pudiera superar cada obstáculo. Cada sacrificio y esfuerzo que han hecho para verme crecer y alcanzar mis metas no tiene precio, y este logro es en gran parte, gracias a ustedes. Este trabajo no solo es el reflejo de mi esfuerzo, sino también de su cariño y dedicación. Gracias por darme la confianza para seguir adelante y por hacerme sentir que no estoy sola en este camino.

A la Dra. Norma Angélica Ruiz Torres por darme la confianza y oportunidad de realizar este trabajo de investigación, por su amistad, por sus consejos y el tiempo y esfuerzo que me dedicó para lograr llevar a cabo esta tesis hasta el final, gracias por haberme brindado su apoyo incondicional.

A mis amigos y compañeros de la generación quienes han sido una fuente constante de apoyo, risas y motivación a lo largo de este proceso. Gracias por estar a mi lado en los momentos de estrés, por ofrecerme su ayuda, por escucharme cuando necesitaba desahogarme y por recordarme, incluso en los días más difíciles, lo importante que es disfrutar el camino. Su amistad ha sido un pilar fundamental para mantenerme equilibrado/a y seguir adelante.

A mis profesores que durante toda mi carrera profesional han aportado con un granito de arena a mi formación moral y profesional con cada uno de sus conocimientos y experiencias compartidas. Gracias por sus amistad, apoyo y confianza.

DEDICATORIA

A Dios agradezco principalmente a Dios por darme vida para cumplir esta meta, por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en momentos de debilidad.

A mis Padres por su amor incondicional y su apoyo en esta etapa de este importante logro, por alentarme a luchar por mis sueños y estar ahí siempre que más los necesité, recordándome a cada momento que en la vida lo que más cuesta es lo que realmente vale la pena, por los valores que me han inculcado y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida.

A mi Hermana cuyo apoyo incondicional han sido fundamental durante este proceso. A lo largo de los momentos más desafiantes, siempre estuvo allí para ofrecerme su aliento, consejos y, sobre todo, su paciencia. Su capacidad para entender mis preocupaciones y darme las palabras justas para seguir adelante ha sido una fuente de fortaleza para mí. Gracias por ser no solo una hermana, sino también una amiga y una fuente de inspiración.

A mis Tías quienes siempre me han brindado su amor, apoyo y sabiduría a lo largo de este camino, siendo parte clave en mi educación. Su generosidad y esfuerzo constante me han motivado a seguir adelante y a no rendirme nunca.

A mis amigos: Por acompañarme y brindarme su apoyo durante esta hermosa etapa: Jessica Villanueva, Ángel Onan, Aldo Muñoz, Benito Ortega, Max Sánchez, Iván Luna, Jesús Flores, Deysi Mejía, Luis Cruz, Mario Rodríguez, Fernando García, Francisco de Anda, Leonel Salinas, Lizbeth Martínez, Isabel Torres, Ernesto Hernández, Ignacio Flores, Juan Pablo Gutiérrez, Erick Mothe, Gustavo Barrera, Andrés Lima, Tomas Gutiérrez, Armando López, Gustavo Pacheco, Christian Cuevas, Miguel Zamora, Rigoberto González, Gisela Hernández, Alan Hernández, Yarely García, María José Rodríguez, José Alfredo Hernández, Victoria Lopez, José Carlos Cuervas, Uriel Colín, Alberto Preciado, Ángel Meza, Manuel Segovia, Gustavo Preciado, Víctor Martínez, Yael Arellano, Dayana Montelongo, Karen Anguiano, Omar García, Karina Puga, Carlos Rosales, Iván Madrueño, Mauricio Rosales, Esaú Villa, Angel Villalvazo, Elizabeth Aragón.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIA.....	v
ÍNDICE GENERAL	vi
ÍNDICE DE CUADROS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	x
I.- INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 HIPÓTESIS	2
II. - REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Antecedentes del Maíz.....	3
2.2 Importancia del Maíz	3
2.3 Descripción del Zn.....	4
2.4 Funciones del Zn en la planta	4
2.5 Deficiencia del Zinc	5
2.6 Disponibilidad del Zn	6
2.7 Nanopartículas	6
2.8 Uso de la Nanotecnología	7
2.9 Nanopartículas de Zn.....	8
2.10 Toxicidad por Zn.....	8
III. - MATERIALES Y MÉTODOS.....	9
3.1 Ubicación del experimento	9
3.2 Descripción del material genético	9
3.3 Manejo Nutricional.....	9
3.4 Preparación del sustrato	10
3.5 Siembra.....	10
3.6 Tratamientos.....	10
3.7 Manejo del cultivo.....	10
3.7.1 Riego	10
3.7.2 Control de plaga y enfermedades.....	10

3.8 Variables evaluadas	11
3.8.1 Número de hojas	11
3.8.2 Lectura de clorofila	11
3.8.3 Diámetro ecuatorial delgado del tallo	11
3.8.4 Diámetro ecuatorial ancho del tallo	11
3.8.5 Longitud de la raíz	11
3.8.6 Altura de la planta	11
3.8.7 Biomasa del tallo	11
3.9 Diseño Experimental	11
IV. - RESULTADOS Y DISCUSIÓN	12
4.1 Análisis de varianza	12
4.2 Comparación de medias	13
4.2.1 Número de hojas	13
4.2.2 Altura de la planta	13
4.2.3 Diámetro del tallo	14
4.2.4 Ancho de tallo	14
4.2.5 Longitud de la radícula	14
4.2.6 Contenido relativo de la clorofila en la base de la hoja	15
4.2.7 Contenido relativo de la clorofila en la parte media de la hoja	15
4.2.8 Contenido relativo de la clorofila en el ápice de la hoja	16
4.2.9 Peso seco del tallo	16
4.3 Correlación de Pearson	17
V. - CONCLUSIONES	21
VI. - BIBLIOGRAFÍA	22

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. – Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables evaluadas en invernadero en plantas tratadas con NPsZnO.	12
Cuadro 2. – Cuadrados medios del análisis de varianza por las variables evaluadas en invernadero.	13
Cuadro 3. – Comparación de medias para las variables evaluadas en invernadero.	15
Cuadro 4. – Comparación de medias de la variable contenido relativo de clorofila y peso seco de tallo.	17
Cuadro 5. - Coeficientes de correlación de Pearson entre las variables evaluadas en el invernadero.....	20

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Lugar donde se hizo el experimento.....	9
--	---

RESUMEN

La nanotecnología ha ganado considerable atención en la investigación agrícola debido a sus propiedades únicas y a su potencial para mejorar el crecimiento y desarrollo de las plantas. En el caso del maíz (*Zea mays*), un cultivo de gran importancia global, las nanopartículas de zinc pueden desempeñar un papel crucial en su nutrición y salud.

El trabajo de investigación se realizó en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), en el invernadero No. 2 del Departamento de Fitomejoramiento, se estableció un experimento para determinar contenido relativo de clorofila, crecimiento aéreo y radicular de plantas de maíz (*Zea mays* L.), tratadas con diferentes dosis de nanopartículas de óxido de zinc (NPsZnO), además de otras variables agronómicas.

Se trabajó con el híbrido RX-715, se sembró en bolsas de polietileno negro de 5 L, como sustrato se mezcló homogéneamente vermiculita y perlita con una proporción 60:40, se llenaron 40 bolsas y se sembraron dos semillas en cada una, enseguida se acomodaron en el invernadero. Se evaluaron 5 tratamientos y cada uno constó de 8 repeticiones. Las dosis de NPsZnO que se utilizaron fueron 0, 25, 50, 75 y 100 ppm, sustituyendo al Zn en la solución nutritiva de Hoagland and Snyder (1933), con la cual se regó las plantas manualmente.

Las variables evaluadas fueron número de hojas (Nhojas), altura de la planta (Apta), contenido relativo de clorofila de la base de la hoja (Cbase), contenido relativo de clorofila de la parte media de la hoja (Cbase), contenido relativo de clorofila del ápice (Capice), tallo ancho (TalloA), tallo delgado (TalloD), longitud de radícula (LRad) y peso seco del tallo (PST). El experimento se estableció en un diseño experimental completamente al azar. Se evaluaron plantas en crecimiento vegetativo entre V5 y V7, etapas donde el tallo comienza a alongarse y el sistema de raíces nodales crece. Con los datos se realizó un análisis de varianza, la comparación de medias con la Prueba de Tukey, con el Paquete de software SAS (9.1).

Los resultados obtenidos en este experimento mostraron diferencias estadísticas significativas para las variables número de hojas, altura de planta, tallo ancho, tallo

delgado, longitud de radícula, contenido relativo de clorofila en la base de la hoja y peso seco del tallo.

Presentó una mejor respuesta fisiológica en tallo ancho, longitud de radícula, número de hojas, contenido relativo de clorofila en el ápice y peso seco del tallo, al aplicar 25, 50 y 75 ppm de NPsZnO, indicando que este es el rango de aplicación en el maíz.

El contenido relativo de clorofila en el ápice de la hoja mostró correlaciones positivas con la mayoría de las variables. El número de hojas, altura de planta, tallo delgado, tallo ancho y longitud de radícula mostraron una correlación positiva y altamente significativa con las demás variables.

En general mejores resultados se obtuvieron al aplicar 50 ppm NPsZnO al sustrato.

Palabras claves: maíz, nanopartículas de zinc, clorofila, biomasa, raíz.

I.- INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) es el alimento más importante de México, no solo es un pilar fundamental en la dieta diaria, sino que también es un símbolo de identidad, historia y tradición. Además de su importancia cultural, el maíz juega un papel importante en la economía agrícola del país.

Actualmente se buscan nuevas formas tecnológicas para potencializar los rendimientos de este cultivo, una opción es el uso de la nanotecnología, en este sector se desarrollan nanopesticidas, nanofertilizantes y sistemas de liberación controlada de nutrientes. Estos productos permiten una mayor precisión en la aplicación, reduciendo el uso de químicos y minimizando el impacto ambiental.

Las nanopartículas de zinc (NPsZnO) han ganado atención en la investigación científica debido a sus diversas aplicaciones, tanto en la industria como en la agricultura. El zinc es un micronutriente esencial para las plantas, involucrado en procesos como la fotosíntesis, la síntesis de proteínas y la regulación enzimática. Sin embargo, el uso de las NPsZnO plantea tanto beneficios como posibles riesgos. A concentraciones adecuadas, pueden mejorar la absorción de nutrientes y aumentar la resistencia de las plantas a factores de estrés ambiental, como enfermedades o condiciones adversas. Su interacción con las plantas y con el medio ambiente aún está siendo estudiado, ya que la acumulación excesiva de estas nanopartículas podría generar efectos tóxicos.

En esta investigación se estudió el efecto de cinco tratamientos con NPsZnO (0, 25, 50, 75, y 100 ppm) en el crecimiento de las plantas de maíz y en el contenido relativo de clorofila determinado con un medidor SPAD 502 Plus. El trabajo se llevó a cabo en invernadero y se evaluaron plantas en crecimiento vegetativo V5 y V7.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar variables agronómicas y fisiológicas en plantas de maíz tratadas con nanopartículas NPsZnO, cultivadas en invernadero.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar la cantidad relativa de clorofila y biomasa aérea en plantas de maíz tratadas con diferentes concentraciones de NPsZnO.
2. Identificar diferencias en variables agronómicas en plantas de maíz tratadas con NPsZnO.

1.3 HIPÓTESIS

Hi. La aplicación al sustrato de NPsZnO incrementa el contenido relativo de clorofila, la biomasa aérea, y el crecimiento en plantas de maíz.

Ho. La aplicación al sustrato de NPsZnO no incrementa el contenido relativo de clorofila ni la biomasa aérea, ni afecta el crecimiento en plantas de maíz.

II. - REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Antecedentes del Maíz

El maíz es originario de América y es asociado a las culturas precolombinas. Su ubicación geográfica más específica es en el sur de México y norte de América Central (Golik *et al.*, 2018). Se domesticó hace aproximadamente 9000 años en México a partir del teosinte (Castro *et al.*, 2013). Este cultivo permitió que aparecieran culturas como la Olmeca, Maya, Teotihuacana, Mexica, entre otras (Barros, 1997).

Crece en regiones con precipitaciones de 480 mm hasta 1300 mm, con un rendimiento óptimo del cultivo (SIAP, 2018), lo que le otorga características fenotípicas específicas como: diferente altura de planta, tolerancia y adaptación a diferentes climas, tipos de suelo y altitudes que van desde el nivel del mar hasta los 3000 msnm (Santillán, 2022).

Se encuentra muy asociado al hombre, con diferentes técnicas para producirlo, almacenarlo y transformarlo al paso de los años (Delgado *et al.*, 2009). Actualmente sigue siendo el principal sustento de las culturas rurales indias y mestizas por su alto contenido nutritivo y a su magnífico rendimiento (Barros, 1997).

2.2 Importancia del Maíz

Es el cultivo más importante del país, dado que el consumo de maíz y tortillas representa cerca de 47.0 % del promedio de calorías (Figueroa *et al.*, 2014). Este cereal se siembra en más de la mitad de la superficie agrícola de México, con alrededor de 7.46 millones de hectáreas (SIAP, 2023). El consumo de este grano está acompañado por tradición y conocimiento popular. Más allá de la elaboración de cientos de alimentos, también ha sido usado como materia prima para elaborar artesanías (González, 2013).

Las técnicas tradicionales para la producción de maíz no permiten que el cultivo exprese su potencial de rendimiento, por lo cual, actualmente existen diversas

investigaciones que estudian su nivel genético, molecular y sobre todo agronómico para explotar al máximo su potencial (Boada y Espinoza, 2016).

2.3 Descripción del Zn

El Zn es un elemento esencial para que las plantas crezcan y se desarrollen óptimamente. La cantidad de Zn que ocupan para crecer y desarrollarse es pequeña puesto que oscila entre los 15 y 20 miligramos por kilogramo de tejido seco; representando menos de 0.1% del peso seco total del tejido de la planta. Por tal motivo, este elemento está clasificado en los micronutrientes (Romero & Flores, 2017).

Si el Zn no se suministra como nutriente o no está en la cantidad adecuada, una o más funciones fisiológicas de las plantas se ven comprometidas y el crecimiento se afecta severamente (Selva & SA, 2011). La planta absorbe este elemento como catión divalente (Zn^{2+}) o quelato vía radical o foliar (Rodríguez & Florez, 2004).

2.4 Funciones del Zn en la planta

Este elemento funciona principalmente como catión divalente en las metaloenzimas, algunas de estas unen las enzimas y sus correspondientes sustratos, o también a su vez, el Zn puede formar complejos tetrahídricos con el N y con el O, especialmente van ligados de S en una variedad de compuestos orgánicos (Kyrkby & Römheld, 2008).

Este elemento es cofactor de numerosas enzimas como las son: anhidrasas, oxidasas y peroxidasas. Estas enzimas desempeñan un papel fundamental en los procesos de la regulación del metabolismo del N, la proliferación celular, la fotosíntesis, y la síntesis de auxinas (Ratto & Miguez, 2006).

Una de las principales funciones que tiene el Zn es la expresión y regulación de genes, pues este elemento ha sido implicado también en la regulación procesos biológicos como la floración, la fotomorfogénesis y las respuestas a patógenos (Castillo *et al.*, 2018).

Este elemento activa la enzima triptófano sintetasa, esta se encarga de la síntesis del triptófano para la biosíntesis del ácido indolacético (AIA), expansión foliar y crecimiento de brotes en zonas meristemáticas (Gil *et al.*, 2012). Muchas enzimas dependientes de este elemento actúan directo en el metabolismo de los carbohidratos en especial en las hojas (Kyrkby & Römheld, 2008).

El Zn participa con algunas enzimas en la captación de factores de estrés biótico y abiótico que pueden ser originados por organismos patógenos o también por cambios ambientales para luego dar respuesta de defensa de las plantas para contrarrestar esos estreses (Romero & Flores, 2017).

El uso de pesticidas que incluyen este elemento en sus ingredientes activos es mayormente usado en programas de protección fitosanitaria (Casierra Posada & Poveda, 2005).

2.5 Deficiencia del Zinc

En maíz es frecuente la aparición de deficiencias en las primeras semanas del cultivo. Se manifiesta en plantas jóvenes, teniendo un color amarillento en la parte de la lámina entre nervaduras (Selva & SA, 2011). Los síntomas de deficiencia generalmente aparecen en la segunda o tercera semana del ciclo, una característica es su corta duración (Ratto & Miguez, 2006). Las deficiencias de Fe y Zn son el mayor problema a escala global teniendo como consecuencia pérdidas en el rendimiento y daños en los frutos, disminuyendo la calidad de estos (Roca, 2007).

Otros síntomas de deficiencia que se pueden observar en maíz son hojas con clorosis intervenal, enrollamiento y disminución de hojas, crecimiento reducido y entrenudos cortos, en el caso de las raíces se verá un escaso desarrollo radicular (Selva & SA, 2011). Puede llegar a que sean infértiles las espiguillas en dados casos (Manríque, 2017).

Los síntomas se pueden confundir con los de otros micronutrientes tales como el hierro, cobre o manganeso, por lo tanto, se recomienda realizar un análisis de suelo y de la planta que identifiquen el micronutriente deficiente (Almendros *et al.*, 2008).

2.6 Disponibilidad del Zn

El Zn del suelo es procede de los minerales que presentan en el material de origen como el sulfuro de Zn (esfarelita, blenda), el carbonato de Zn (esmitsonita), el silicato de Zn (willemita), el espinelio de zinc y hierro (franklinita) y el óxido de Zn (zinczita) (Rolón *et al.*, 2023). Considerado como el micronutriente más limitante para la producción de cultivos (Manríque, 2017). Su disponibilidad varía de acuerdo con el material de origen, clase textural, valores de pH, contenido de materia orgánica, profundidad del suelo y del propio sistema de manejo del suelo (Linhares *et al.*, 2010).

Su disponibilidad aumenta con la disminución del pH y la presencia de sulfato (Rodríguez & Florez, 2004). Los suelos con concentraciones altas de fósforo y sales disponibles insolubilizan el Zn en las superficies de las raíces, disminuyendo su absorción (Selva & SA, 2011). En suelos ácidos las altas concentraciones de Fe y Mn afectan la disponibilidad de Zn (Marcano, Rodríguez & Mohsin, 2003). La aplicación de abonos de origen animal positivamente ayuda a su disponibilidad en los suelos (Almendros *et al.*, 2008).

2.7 Nanopartículas

En el campo de la ciencia, el término nanopartículas se refiere a estructuras que equivalen a las mil millonésimas parte de algo (Gómez-Garzón, 2018). Las nanopartículas poseen la característica que al ser de tamaño nanométrico sus propiedades puedan aumentar el área superficial en cuanto a su volumen, generando nuevas aplicaciones (Londoño, 2023). El tamaño de estos materiales permite que expresen propiedades físicas, químicas y biológicas distinto a las del mismo material con tamaños de partícula mayores (Galindo-Guzmán *et al.*, 2022). Estas son creadas a partir de diferentes tipos de metales como el oro, hierro, platino o de óxidos metálicos (Liu y Lal, 2015).

El interés de usar las NPs se basa en la reducción del tamaño, la cual lleva propiedades no presentes normalmente a escala macroscópica, otorgándoles así

características de translocarse y modificarse bioquímicamente en vivo (Peng *et al.*, 2016).

Se han registrado efectos tanto de incremento e inhibición con el uso de las NPs en las plantas, estas variaciones se deben a varios factores según la especie de planta, la etapa de crecimiento, las condiciones de crecimiento, el método de aplicación, la dosis, y la duración de la exposición a las NPs (Rizwan *et al.*, 2016).

2.8 Uso de la Nanotecnología

La nanotecnología ha tenido mucha atención con el tiempo y promueve la aplicación de nanopartículas en la industria agrícola (Galindo-Guzmán *et al.*, 2022). Con su uso y aplicación se procura encontrar métodos ecoamigables para mejorar la practicas agrícolas modernas (Méndez-Argüello *et al.*, 2016). Han surgido como un avance tecnológico-científico que puede transformar sectores de la agricultura proporcionando herramientas novedosas como para la detección molecular de estrés biótico y abiótico (Saldívar *et al.*, 2018).

Las nanopartículas (NPs) ayudan a reducir la toxicidad y a aumentar la bioactividad (González-Lemus *et al.*, 2024). Tienen el potencial para revolucionar los sistemas agrícolas, y poder producir nanofertilizantes, nanopesticidas, así como muchos otros agro nanoproductos (Saldívar *et al.*, 2018). Tienen más uso para la protección de productos agroquímicos (pesticidas y biopesticidas), por lo cual se han utilizado nanosistemas de liberación, como nanocápsulas, nanopartículas y nanoemulsiones (Armendaris-Barragán & Galindo-Rodríguez, 2018).

La nanotecnología en el sistema de postcosecha ayudará en ciertos procesos como la conservación, al envasado de alimentos, al fortalecimiento de las fibras naturales (Estrada Urbina, 2019). Incrementando el volumen de las cosechas en comparación a lo que se hubiera cosechado tradicionalmente (Quispe, 2010).

La agro nanotecnología, la cual se puede definir como la ciencia de manipular NPs y tratar de ayudar a reducir la contaminación ambiental (Aguilar, 2020).

Investigaciones que realizaron Méndez-Argüello *et al.*, (2016) mencionan que NPs metálicas de cobre, óxido de zinc y fierro, cuando se aplican a bajas

concentraciones (≤ 50 ppm), pueden incrementar el porcentaje de germinación de semillas; aumentar su vigor y promover un mayor crecimiento de diversas familias de plantas. También se ha comprobado que altas concentraciones (≥ 100 ppm) causan en la mayoría de los casos efectos fitotóxicos en plántulas.

2.9 Nanopartículas de Zn

Se ha señalado que estas NPsZnO reducen la presencia de enfermedades por su actividad antifúngica (Méndez-Argüello *et al.*, 2016). El efecto antifúngico se debe a que causa malformación en las hifas, provocando la muerte de los hongos (Servin *et al.*, 2015). Las NPsZnO aplicadas vía foliar minimizan el uso de fertilizantes, aumentan la eficiencia y mayor disponibilidad de nutrientes, tiene efectos sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas en comparación con las formas tradicionales de Zn (Rivera-Gutiérrez, 2021). Ha demostrado aumentar el rendimiento, teniendo mejor calidad comercial y nutracéutica, con aumentada biomasa aérea, compuestos bioactivos e inducen la acumulación de minerales esenciales (Fortis-Hernández *et al.*, 2024). En las semillas muestra efectos significativos ayudando en el proceso de la germinación (Burman *et al.*, 2013).

2.10 Toxicidad por Zn

Los síntomas de toxicidad por Zn se manifiestan con clorosis y crecimiento reducido de la planta, inhibiendo la fijación de CO₂ y el transporte de los hidratos de carbono en el floema, como consecuencia alterando la permeabilidad de la membrana celular (Casierra-Posada & Poveda, 2005). Inhibe la fotosíntesis en varias de sus etapas y a través de diferentes mecanismos (Posada *et al.*, 2010). La planta mostrará retardo en el crecimiento y exportación limitada de fotoasimilados de las hojas a las raíces (Ruano *et al.*, 1988). Sin embargo, Rout y Das (2009) mencionan que los síntomas generales son retraso en el crecimiento de los brotes, enrollamiento de las hojas jóvenes, muerte de las puntas de las hojas y clorosis.

III. - MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación del experimento

El experimento se realizó en el periodo vacacional primavera-verano del 2023 en el invernadero No. 2 perteneciente al Departamento de Fitomejoramiento de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, localizada en la Calzada Antonio Narro #1923 en Buenavista, Saltillo, Coahuila. Con coordenadas 25° 21' 5" latitud norte, 101° 1' 52" longitud oeste, con una altitud de 1742 msnm.

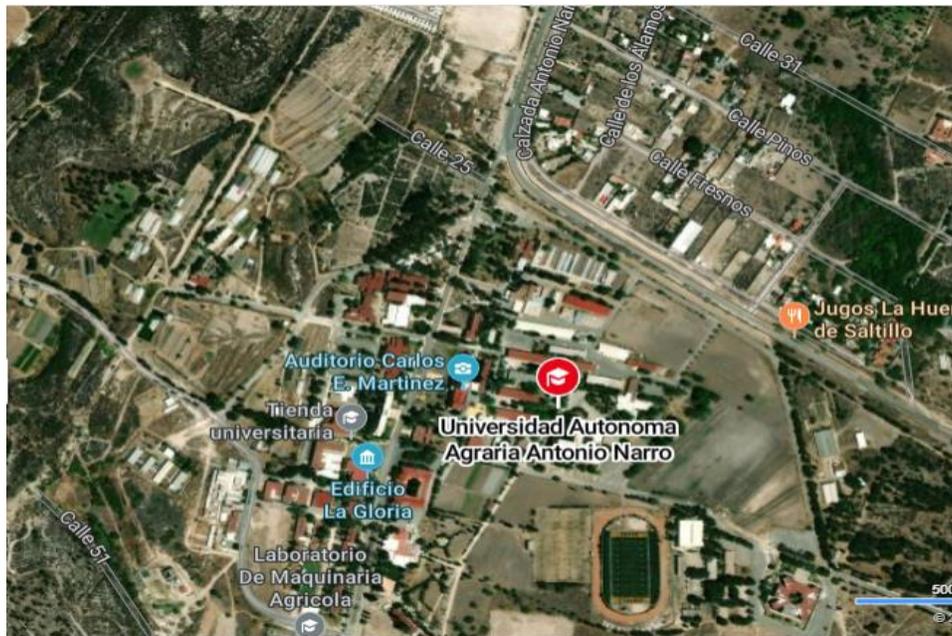


Figura 1. Lugar donde se hizo el experimento.

3.2 Descripción del material genético

Se utilizó semilla de maíz (*Zea mays* L.) del híbrido RX-715 de la empresa Asgrow, tiene buen rendimiento, calidad de grano y su precocidad es ideal para cierre de siembras y temporal. Se usa para forraje y grano el cual es de color amarillo.

3.3 Manejo Nutricional

Al inicio se aplicaron 400 mL de agua por planta. Seis días después de la siembra se inició la aplicación al sustrato de la solución nutritiva (200 mL) con macro y micronutrientes excepto Zn (N 210 ppm, K 235 ppm, Ca 200 ppm, P 31 ppm, S 64 ppm, Mg 48 ppm, B 0.5 ppm, Fe 5 ppm, Mn 0.5 ppm, Cu 0.02 ppm, Mo 0.01 ppm) de acuerdo con Hoagland y Snyder (1933), además de 200 mL de agua, por planta

cada tercer día. Nueve días después de la siembra se comenzó a aplicar la dosis respectiva de NPsZnO, 100 mL de la suspensión a cada planta, juntamente con la solución nutritiva (200 mL). Las NPsZnO sustituyeron la fuente de Zn en la solución nutritiva. La nutrición y la dosis de las NPsZnO se mantuvieron hasta el final del estudio.

3.4 Preparación del sustrato

La mezcla del sustrato utilizado fue de 60:40 (V:P) vermiculita y perlita, mezclándolos homogéneamente y al mismo tiempo humedeciendo, posteriormente se procedió a revisar las propiedades físicas, en las cuales fueron la aireación y la retención de la humedad del sustrato para que estuviera adecuado para el cultivo, posteriormente se llenaron las bolsas negras para vivero y se sembró la semilla de maíz.

3.5 Siembra

La siembra se realizó el día 25 de mayo del 2023, dos semillas por bolsa, obteniendo un total de 40 bolsas, las cuales se distribuyeron dentro de la cama del invernadero al azar, y se procedió a dar el primer riego con agua. A los doce días se extrajo una plántula en donde emergieron dos, dejando una por bolsa.

3.6 Tratamientos

Se evaluaron 5 tratamientos con NPsZnO, que incluyeron el testigo con 0 ppm, 25 ppm, 50 ppm, 75 ppm y 100 ppm en suspensión.

3.7 Manejo del cultivo

3.7.1 Riego

Los riegos se aplicaron de forma manual, cada tercer día, con una probeta de plástico graduada, de acuerdo con lo explicado en el manejo nutricional (revisar sección 3.3).

3.7.2 Control de plaga y enfermedades

Se hizo un monitoreo diario en el invernadero para detectar la presencia de alguna plaga o enfermedad, pero no hubo incidencia.

3.8 Variables evaluadas

Las variables se evaluaron entre V5 y V7 (5 o 7 hojas bien desarrolladas).

3.8.1 Número de hojas

Al final de la evaluación, se contabilizó el número de hojas de cada planta.

3.8.2 Lectura de clorofila

Se obtuvo el dato del contenido relativo de la clorofila con el medidor portátil de clorofila SPAD 502, para esto se llevaron a cabo tres lecturas en la 5a hoja, en la base, en la parte media y en el ápice.

3.8.3 Diámetro ecuatorial delgado del tallo

Con ayuda de un Vernier digital se hizo la medición del lado más delgado del tallo a la mitad de lo alto de la planta.

3.8.4 Diámetro ecuatorial ancho del tallo

Con ayuda de un Vernier digital se hizo la medición del lado más ancho del tallo a la mitad de lo alto de la planta.

3.8.5 Longitud de la raíz

Se extrajo la raíz, se eliminó el sustrato y se midió la longitud con una regla de metal de 60 cm.

3.8.6 Altura de la planta

Con una regla de metal de 60 cm se midió la altura de cada una de las plantas desde la base hasta la última hoja verdadera.

3.8.7 Biomasa del tallo

En cada planta se cortó el tallo hasta la inserción con la raíz, se colocó en una bolsa de papel de estraza, y posteriormente se llevaron al área de secado del Programa de Cereales, para a continuación obtener el peso seco en una balanza semianalítica.

3.9 Diseño Experimental

El experimento se estableció en un diseño experimental completamente al azar, con 8 repeticiones por tratamiento (5) de NPsZnO (0, 25, 50, 75 y 100 ppm en suspensión). Los datos se analizaron con el Paquete de software SAS (9.1).

IV. - RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis de varianza

En el Cuadro 1 se muestran los resultados del análisis de varianza de los datos obtenidos de la evaluación de tratamientos con diferentes concentraciones de NPsZnO de las siguientes variables: número de hojas (Nhojas), altura de planta (Aplanta), diámetro de tallo (talloD), ancho del tallo (TalloA) y la longitud de radícula (LRAD). Se observó que la variable número de hojas (Nhojas) presentó diferencias significativas ($P > 0.05$) para la fuente de variación tratamientos evaluados, mientras que las demás variables, como altura de planta (Aplanta), diámetro de tallo (talloD), ancho del tallo (TalloA) y longitud de radícula (LRAD) presentaron diferencias $P > 0.01$. Esto se debe a la respuesta diferencial a las distintas concentraciones de NPsZnO que se aplicaron por tratamiento.

Cuadro 1. – Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables evaluadas en invernadero en plantas tratadas con NPsZnO.

F.V.	G.L.	Nhoja	Aplanta (cm)	TalloD (mm)	TalloA (mm)	LRAD (cm)
Tratamiento	4	2.00 *	1655.25 **	136.87 **	207.89 **	332.00 **
Error	35	0.66	21.13	3.20	7.19	19.57
C.V. %		12.33	13.33	11.88	13.42	6.81

F.V. = Fuente de variación; G.L.= Grados de libertad; Nhojas = Número de hojas; Aplanta = Altura de planta; TalloD = Diámetro de tallo; TalloA = Ancho de tallo; LRad = Longitud de la radícula; *, ** = Significativo al 0.05 y 0.01 en niveles de probabilidad, respectivamente.

En el Cuadro 2 se presentan los cuadrados medios de las variables clorofila en la base de la hoja (Cbase), clorofila en la mitad de la hoja (Cmedia), clorofila en el ápice de la hoja (Cápice) y peso seco del tallo (PSTallo), dos variables resultaron significativas a $P > 0.01$, siendo el contenido de clorofila en la base de la hoja (Cbase) y en la mitad de la hoja (Cmedia), pues este micronutriente es importante en la síntesis de la clorofila. Mientras que Cápice y PSTallo resultaron significativas a $P > 0.05$, indicando una respuesta diferencial a la aplicación de NPsZnO, en sus diferentes concentraciones.

Cuadro 2. – Cuadrados medios del análisis de varianza por las variables evaluadas en invernadero.

F.V.	G.L.	Cbase (SPAD)	Cmedia (SPAD)	Cápice (SPAD)	PSTallo (g)
Tratamiento	4	447.93 **	30.58 ^{NS}	93.14 ^{NS}	650.11 *
Error	35	23.85	23.38	36.49	7.39
C.V. %		21.13	15.76	20.48	15.93

F.V. = Fuente de variación; G.L. = Grados de libertad; Cbase = Clorofila en la base de la hoja; Cmedia = Clorofila en la parte media de la hoja; Cápice = Clorofila en el ápice de la hoja; PSTallo = Peso seco del tallo; *, ** = Significativo al 0.05 y 0.01 en niveles de probabilidad, respectivamente. NS = Diferencias no significativas.

4.2 Comparación de medias

4.2.1 Número de hojas

Los resultados obtenidos en el análisis de comparación de medias se presentan en el Cuadro 3, se muestra a la variable número de hojas (Nhojas) con diferencias significativas entre los tratamientos comparados con el testigo, los tratamientos de 25 ppm y 100 ppm fueron estadísticamente iguales, mientras que, el tratamiento de 75 ppm los superó ligeramente, por último, destacando el tratamiento de 50 ppm como el mejor con 7 hojas.

4.2.2 Altura de la planta

En la variable altura de planta (Aplanta), el testigo mostró el menor valor con 9.06 cm. Investigaciones realizadas por Kirkby & Römheld (2008) indican que uno de los síntomas de deficiencia de Zn es el crecimiento retardado e inhibición en la elongación de los entrenudos, haciendo que la planta tenga un porte bajo. El resto de los tratamientos presentaron un comportamiento estadísticamente superior con respecto al testigo, con valores en un rango de 8.31 cm (25 ppm) a 44.25 (75 ppm). Faizan *et al.* (2021) mencionan en sus investigaciones que cuando la cantidad de Zn resulta adecuada y la planta puede asimilarlo, la capacidad de intercambio de gases mejora, promoviendo a su vez el crecimiento y la biomasa de la planta. Prasad *et al.* (2012) comentan que en semillas y plantas de cacahuete (*Arachis hypogaea*) tratadas a una concentración de 1000 mg L⁻¹ de NPsZnO, se promovió la germinación y una mayor elongación de raíz y de tallo. Sedghi *et al.* (2013)

mencionan que en plantas de soya (*Glycine max*) la dosis de 1 g L⁻¹ de NpsZnO promovió efectos significativos en el crecimiento, en comparación con las plantas no tratadas. El crecimiento en las plantas ocurre principalmente en meristemos donde la mitosis rápida proporciona nuevas células. A medida que estas células se diferencian, aportan nuevo tejido vegetal.

4.2.3 Diámetro del tallo

La variable diámetro del tallo (TalloD) mostró diferencias significativas entre tratamientos, teniendo el testigo el valor más bajo. El resto de los tratamientos mostraron estadísticamente una tendencia similar, superando por lo tanto al testigo. Pandey *et al.* (2010) mencionan que este elemento es necesario en pequeñas cantidades, es crucial para el buen desarrollo vegetativo, ya que este micronutriente es precursor en la producción de auxinas, fitorreguladores del crecimiento, las cuales van a influir en la elongación, vigorosidad y división celular.

4.2.4 Ancho de tallo

En el ancho del tallo (TalloA) se observaron diferencias significativas para la fuente de variación tratamientos, con una tendencia muy similar a las variables explicadas anteriormente, el testigo obtuvo el menor valor de ancho de tallo, siendo estadísticamente diferente al resto de los tratamientos con 25, 75 y 100 ppm. Al respecto, Mukherjee *et al.* (2014) reportaron que las NPs influyen significativamente en diversos aspectos fisiológicos y en mayor crecimiento en el tallo en cultivos hortícolas.

4.2.5 Longitud de la radícula

En la variable longitud de radícula (LRad) todos los tratamientos superaron estadísticamente al testigo, con valores entre 66.00 cm (100 ppm) y 69.06 cm (25 ppm). Selva & Sa (2011) mencionan que el Zn es necesario para la producción de triptófano que es un aminoácido esencial, precursor del ácido Indol-Butírico (hormona de crecimiento vegetal) el cual ayuda a tener un buen sistema radicular a la planta.

Cuadro 3. – Comparación de medias para las variables evaluadas en invernadero.

Tratamiento	Nhojas	Aplanta (cm)	TalloD (mm)	TalloA (mm)	LRAD (cm)
Testigo	5.75 b	9.06 b	7.70 b	10.87 b	53.62 b
25 ppm	6.75 ab	38.31 a	16.73 a	22.65 a	69.06 a
50 ppm	7.00 a	41.50 a	16.92 a	21.95 a	68.75 a
75 ppm	6.87 ab	44.25 a	17.47 a	22.30 a	67.25 a
100 ppm	6.75 ab	39.18 a	16.52 a	22.13 a	66.00 a
\bar{x}	6.63	34.46	15.07	19.98	64.94
Tukey	1.17	6.60	2.57	3.85	6.36

Variables con la misma literal dentro de cada columna son estadísticamente iguales; Ppm = Partes por millón; Nhojas = Número de hojas; Aplanta = Altura de planta; TalloD = Diámetro de tallo; TalloA = Ancho de tallo; LRad = Longitud de la radícula; \bar{x} = Media.

4.2.6 Contenido relativo de la clorofila en la base de la hoja

En el Cuadro 4 se presenta la comparación de medias de la variable contenido relativo de clorofila evaluada en la base, parte media y ápice de las hojas. Se observó que en el contenido relativo de clorofila en la base de la hoja (Cbase), el testigo obtuvo el valor más alto, superando estadísticamente a los demás tratamientos. Prasad *et al.* (2012) mencionan que el Zn desempeña una importante función en la producción de clorofila y por ende en la fotosíntesis. Las investigaciones realizadas por Galindo-Guzmán *et al.* (2022) indican que las NPsZnO a altas concentraciones disminuyen drásticamente el contenido de clorofila, parece que tal vez la reducción en la cantidad de clorofila se debe a la degradación de los precursores de estos pigmentos. Al parecer, esto sucedió en este trabajo de investigación, ya que el contenido relativo de clorofila fue disminuyendo numéricamente el incrementar la concentración de las NPsZnO.

4.2.7 Contenido relativo de la clorofila en la parte media de la hoja

En la variable contenido relativo de clorofila en la parte media de la hoja (Cmedia), no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos, sin embargo, se observó en el tratamiento con 75 ppm el valor más bajo con 28.48 unidades SPAD. Lo anterior indica que las NpsZnO metálicas, no tienen un efecto positivo en la síntesis de clorofila en este genotipo de maíz, reduciendo su contenido.

4.2.8 Contenido relativo de la clorofila en el ápice de la hoja

En el contenido de clorofila del ápice de la hoja (Cápice), no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos, el testigo obtuvo un resultado bajo con un valor de 24.01 unidades SPAD, en el resto de los tratamientos se observó un ligero incremento, sin embargo, no significativo estadísticamente.

Numéricamente el tratamiento con mejor respuesta fue el de 50 ppm, obteniendo 32.51 unidades SPAD.

En general, los niveles relativos de clorofila fueron menores en la base de las hojas, y a pesar de no encontrar diferencias significativas en la parte media de las hojas y en el ápice, las NPsZnO aumentaron en estas dos regiones la disponibilidad de Zn, favoreciendo la síntesis de clorofila.

Investigación llevada a cabo por Sturikova *et al.* (2018), reveló que la acción de altas concentraciones de NPsZnO, inducen la producción desmedida de especies de radicales oxidantes de oxígeno (ROS), lo que conduce al estrés oxidativo, interrumpiendo la formación de clorofila. Esto es, a concentraciones altas se puede presentar un efecto de toxicidad.

4.2.9 Peso seco del tallo

La variable peso seco del tallo (PSTallo) mostró diferencias significativas entre tratamientos, el testigo obtuvo un valor bajo ya que no se desarrollaron las plantas por ausencia del Zn, obteniendo plantas casi sin biomasa. La mejor respuesta se obtuvo con 75 ppm, con un buen desarrollo y por lo tanto mayor biomasa tanto en tallo como hojas (23.85 g). El tratamiento de 100 ppm fue estadísticamente igual a aplicar 25 o 50 ppm. Estos resultados indican que se debe estudiar la aplicación de NPsZnO en un rango entre 50 (21.35 g de biomasa) y 75 ppm.

Trabajos de investigación realizado por Selva & Sa (2011) indican que el Zn en la mayoría de las plantas cultivadas ayuda a producir una mayor cantidad de materia seca y rendimiento en grano, siendo esencial de las primeras etapas del cultivo. Panwar *et al.* (2012) en sus resultados de investigación mencionan que usando 20

mg L⁻¹ de NPsZnO al follaje se obtuvo mayor crecimiento y producción de biomasa seca en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*).

Por otra parte, Méndez-Argüello *et al.* (2016) en su investigación encontró que las NPsZnO mejoran el crecimiento de las plantas, puede también mejorar la calidad de los frutos, ya que se incrementa la concentración de azúcares.

Cuadro 4. – Comparación de medias de la variable contenido relativo de clorofila y peso seco de tallo.

Tratamiento	Cbase SPAD	Cmedia SPAD	Cápice SPAD	PSTallo (g)
Testigo	36.47 a	33.37 a	24.01 a	1.29 c
25 ppm	20.35 b	29.62 a	32.01 a	20.10 ab
50 ppm	20.08 b	31.95 a	32.51 a	21.35 ab
75 ppm	19.46 b	28.48 a	28.73 a	23.85 a
100 ppm	19.20 b	29.97 a	30.20 a	18.70 b
\bar{x}	23.11	30.68	29.49	17.06
Tukey	7.02	6.95	8.68	3.90

Variables con la misma literal dentro de cada columna son estadísticamente iguales; ppm = Partes por millón; Cbase = Clorofila en la base de la hoja; Cmedia = Clorofila en la mitad de la hoja; Cápice = Clorofila en el ápice de la hoja; PSTallo = Peso seco del tallo; \bar{x} = Media.

4.3 Correlación de Pearson

En el Cuadro 5 de se muestran los coeficientes de correlación donde el contenido de clorofila en la base de la hoja (Cbase) presentó correlación positiva y altamente significativa con la variable contenido relativo de clorofila en la parte media de la hoja, todas las demás correlaciones resultaron negativas. Esto posiblemente se deba a que el contenido de clorofila en la base de la hoja resultó en promedio ser el más bajo, y sí se incrementa afecta el metabolismo de la planta, resultando en una reducción en el crecimiento y desarrollo de las plantas.

El índice de clorofila en la parte media de la hoja (Cmedia) se correlacionó significativamente y de manera negativa con dos variables, diámetro del tallo (TalloD) y el ancho del tallo (TalloA). Esto es, si se incrementa el contenido relativo de clorofila en la parte media de la hoja, se reduce el diámetro del tallo. El resto de los coeficientes de correlación fueron no significativos.

Por otra parte, la variable índice de clorofila en el ápice de las hojas (Cápice) se correlacionó positiva y significativamente con las variables altura de planta (Aplanta), diámetro de tallo (TalloD) y peso seco del tallo (PStallo), mostrando su aporte a través de la fotosíntesis al desarrollo de la planta, posiblemente por ser la región más joven de la hoja. El crecimiento de la hoja es sobre todo por crecimiento por proliferación de las células que están entre el ápice y la base de la hoja, y por aumento del tamaño celular (Bar & Ori, 2014).

El número de hojas (Nhojas) tuvo una correlación altamente significativa con las variables Aplanta, TalloD, TalloA, LRad y PStallo, ya que entre más hojas tenga la planta mayor será la captación solar, aportando azúcares sintetizados durante la fotosíntesis, contribuyendo al crecimiento y desarrollo. Las hojas se originan a partir del meristemo apical caulinar, presente en el tallo principal y en el ápice de cada rama, gracias a la diferenciación de unas células periféricas de dicho meristemo denominadas células fundadoras. Éstas sufren divisiones celulares y se localizan en la zona sub-superficial de las partes laterales del meristemo apical. El proceso de formación de la hoja pasa por tres estados: iniciación, crecimiento, donde se forman las protuberancias foliares y posteriormente los primordios foliares, y expansión y maduración, donde la hoja sobre todo se expande para formar el limbo (Bar & Ori, 2014).

La variable altura de planta (Aplanta) mostró correlación positiva y altamente significativa con las variables TalloD, TalloA, LRad y PStallo, indicando que los efectos de las NPsZnO en esta variable pueden favorecer el desarrollo y acumulación de biomasa de la planta.

El diámetro de tallo (TalloD) tuvo correlación positiva y altamente significativa con las variables de tallo ancho (TalloA), longitud de radícula (LRad) y peso seco del tallo (PST), contribuyendo al desarrollo del tallo, radícula y biomasa aérea.

La variable ancho de tallo (TalloA) se correlacionó positiva y significativamente con las variables longitud de radícula (LRad) y peso seco del tallo (PST), beneficiando al tallo a tener una mejor estabilidad estructural, favoreciendo el desarrollo óptimamente en la parte aérea de la planta y en el sistema radicular.

La variable longitud de radícula (LRAD) tuvo una correlación positiva y altamente significativa con el peso seco del tallo (PST), al tener un sistema radicular desarrollado, la planta absorbe los nutrientes y el agua con mayor facilidad, teniendo una mejor translocación, resultando en un crecimiento óptimo, ganando biomasa la planta, reflejándose en un mayor peso seco.

Cuadro 5. - Coeficientes de correlación de Pearson entre las variables evaluadas en el invernadero.

	Cmedia (SPAD)	Cápice (SPAD)	Nhojas (SPAD)	Apta (cm)	TalloD (mm)	TalloA (mm)	LRAD (cm)	PSTallo (g)
Cbase (SPAD)	0.415**	-0.464**	-0.280 ^{NS}	-0.770**	-0.756**	-0.731**	-0.609**	-0.767**
Cmedia (SPAD)		0.195 ^{NS}	-0.122 ^{NS}	-0.176 ^{NS}	-0.436**	-0.507**	0.141 ^{NS}	0.246 ^{NS}
Cápice (SPAD)			0.240 ^{NS}	0.502**	0.385 ^{NS}	0.279 ^{NS}	0.296 ^{NS}	0.469**
Nhojas				0.526**	0.495**	0.469**	0.525**	0.464**
Apta (cm)					0.906**	0.801**	0.773**	0.959**
TalloD (mm)						0.954**	0.701**	0.913**
TalloA (mm)							0.629**	0.825**
LRAD (mm)								0.757**

** = Significativos ($P \leq 0.01$); * = Significativos ($P \leq 0.05$); NS = Diferencias no significativas; Cbase = Clorofila en la base de la hoja; Cmedia = Clorofila en la mitad de la hoja; Cápice = Clorofila en el ápice de la hoja; PSTallo = Peso seco del tallo; Nhojas = Número de hojas; Apta = Altura de planta; TalloD = Diámetro de tallo; TalloA = Ancho de tallo; LRAD = Longitud de la radícula.

V. - CONCLUSIONES

La respuesta de las plantas de maíz a la aplicación al sustrato de nanopartículas de óxido de zinc en diferentes concentraciones mostró diferencias estadísticas significativas en las variables número de hojas, altura de planta, tallo ancho, tallo delgado, longitud de radícula, contenido relativo de clorofila en la base de la hoja y el peso seco del tallo.

El tratamiento testigo (sin NPsZnO) presentó los valores más bajos en la mayoría de las variables, excepto en el contenido relativo de clorofila en la base de la hoja y el contenido relativo de clorofila en la parte media de la hoja. Mostrando la importancia del Zn en las funciones fisiológicas de las plantas.

El tratamiento con 25 ppm superó a los demás tratamientos en las variables tallo ancho y longitud de radícula, mientras que el tratamiento con 50 ppm en las variables número de hojas y contenido relativo de clorofila en el ápice de la hoja, sin embargo, el tratamiento con 75 ppm sobresalió en la variable peso seco del tallo, indicando que el rango de aplicación de nanopartículas de Zn en maíz esta entre 25 y 75 ppm.

En el contenido relativo de clorofila en el ápice de la hoja mostró correlaciones positivas con las variables altura de planta y peso seco del tallo, indicando su importancia en la acumulación de materia seca a través de la fotosíntesis.

La variable número de hojas mostró una correlación positiva y significativa con las variables altura de planta, tallo delgado, tallo ancho, longitud de radícula y peso seco del tallo, mostrando que el desarrollo del tallo y de la radícula depende de la fenología del maíz.

VI. - BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, J. (2020). Respuesta del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) a la aplicación de nanopartículas de magnetita. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Almendros, P., Rico, M. I., López, L. M., & Álvarez, J. M. (2008). Deficiencia de zinc en los cultivos y correctores de carencia del micronutriente. *Vida rural*, 19(280), 12-16.
- Amezcua, J. C., & Lara Flores, M. (2017). El zinc en las plantas. *Ciencia*, 68, 28–35.
https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/68_3/PDF/zinc_plantas.pdf
- Armendaris-Barragán, B., & Galindo-Rodríguez, S. (2018). La nanotecnología en las ciencias biológicas. *Biología y sociedad*, 1(1), 108-125.
- Bar, M., & Ori, N. (2014). Leaf development and morphogenesis. *Development* 141, 4219-4230.
- Barros C. (1997). El maíz nuestro sustento. *Revista Arqueología Mexicana*, 25:6-15.
- Boada, R., y Espinosa, J. (2016). Factores que limitan el potencial de rendimiento del maíz de polinización abierta en campos de pequeños productores de la Sierra de Ecuador. *siembra*. 3(1):1-10.
- Burman, U., Saini, M. y Kumar, P. (2013). Effect of zinc oxide nanoparticles on growth and antioxidant system of chickpea seedlings. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 95: 605-612.
- Casierra-Posada, F., & Poveda, J. (2005). La toxicidad por exceso de Mn y Zn disminuye la producción de materia seca, los pigmentos foliares y la calidad del fruto en fresa (*Fragaria* sp. cv. Camarosa). *Agronomía Colombiana*, 23(2), 283-289.
- Castillo, J., Ojeda, D., Hernández, A., González, A. C., Robles, L., & López, G. R. (2018). Metaloenzimas de zinc en plantas. *Asociación Interciencia*, 43, 242–248. <ps://www.redalyc.org/journal/339/33957240004/33957240004.pdf>

- Castro, S., López, J. A., Pecina, J. A., Mendoza, M., & Reyes, C. A. (2013). Exploración de germoplasma nativo de maíz en el centro y sur de Tamaulipas, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4(4), 645-653.
- Delgado, G. B., Rojas, E. B., Sánchez, J. M. V., Soto, M. M., Escobar, I. D., & Aispuro, M. D. J. S. (2009). El cultivo de maíz en México. *Agricultura: Revista agropecuaria y ganadera*, (917), 276-279.
- Estrada, J. (2019). *Influencia de las nanopartículas de óxido de zinc sobre la calidad fisiológica y sanitaria de la semilla de maíz nativo (Zea mays L.)* (Bachelor's thesis, Universidad Autónoma de Guerrero (México)).
- Faizan, M., Sehar, S., Rajput, V.D., Faraz, A., Afzal, S., Minkina, T., Sushkova, S., Adil, M.F., Yu, F., Alatar, A.A. 2021. Modulation of cellular redox status and antioxidant defense system after synergistic application of zinc oxide nanoparticles and salicylic acid in rice (*Oryza sativa*) plant under arsenic stress. *Plants* 10, 2254.
- Fernández, R., Morales, L. A., & Gálvez, A. (2013). Importancia de los maíces nativos de México en la dieta nacional: Una revisión indispensable. *Revista fitotecnia mexicana*, 36, 275-283.
- Figueroa, E., Godínez, L., Espinosa, L., Ramírez, O. R., & González, J. (2014). La demanda de maíz en México, 1980-2010.
- Fortis-Hernández, M., Pivaral-Chávez, A., Galindo-Guzmán, A., Preciado-Rangel, P., Ruiz-Ortega, F, & Trejo-Valencia, R. (2024). Nanopartículas de óxido de zinc para incrementar rendimiento, compuestos bioactivos y actividad enzimática en lechuga. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 11(1).
- Galindo-Guzmán, A., Fortis-Hernández, M., La Rosa-Reta, D., Verónica, C., Zermeño-González, H., & Galindo-Guzmán, M. (2022). Síntesis química de nanopartículas de óxido de zinc y su evaluación en plántulas de *Lactuca sativa*. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 13(SPE28), 299-308.
- Gil, A., Marroquín, M., & Martínez, L. (2012). Efecto del zinc sobre la inducción de ramas productivas en gurupa (*Passiflora edulis* Sims). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 6, 152–160.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2011-21732012000200004&lng=en&tlng=es.

- Golik, S., Larran, S., Gerard, G., & Fleitas, M. (2018). Maíz: Importancia, origen, sistemática, morfología y composición química.
- Gómez-Garzón, M. (2018). Nanomateriales, nanopartículas y síntesis verde. *Revista Repertorio de Medicina y Cirugía*, 27(2).
- González Medina, M. (2013). Análisis del proceso agrícola y la importancia del maíz en Santa María Nativitas, Calimaya, Estado de México.
- González-Lemus, U., García, J., Buendía, I., Cenobio-Galindo, A., Campos., R & Zaldívar-Ortega, A. (2024). Nanopartículas de selenio en la agricultura para la alimentación de rumiantes y la disminución de gases de efecto invernadero. *Boletín de Ciencias Agropecuarias del ICAP*, 10(19), 32-37.
- Hoagland, D.R. & Snyder, W.C. Nutrition of Strawberry Plant under Controlled Conditions. (a) Effects of Deficiencies of Boron and Certain Other Elements, (b) Susceptibility to Injury from Sodium Salts. *Proc. Am. Soc. Hortic. Sci.* 1933,30, 288–294
- Kumar, M., & Kumar, P. (2011). Guía para la identificación y el manejo de la deficiencia de nutrientes en cereales. [http://mca.ipni.net/ipniweb/region/mca.nsf/0/1BCFF09902C918F2852581E900640822/\\$FILE/Libro%20IPNI%20final.PDF](http://mca.ipni.net/ipniweb/region/mca.nsf/0/1BCFF09902C918F2852581E900640822/$FILE/Libro%20IPNI%20final.PDF)
- Kyriba, E., & Romel, V. (2008). Micronutrientes en la fisiología de las plantas: funciones, absorción y movilidad. <http://listas.exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/MicronutrientesenlaFisiologia.pdf>
- Linhares, L. A., Egreja F., F. B., de Bellis, V. M., dos Santos, E. A. é Ianhez, R. (2010). Utilização dos modelos de Langmuir e de Freundlich na adsorção de cobre e zinco em solos Brasileiros. *Acta Agronómica*, 59(3), 303-315.
- Lira Saldívar, R. H., Méndez Argüello, B., Santos Villarreal, G., & Vera Reyes, I. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta universitaria*, 28(2), 9-24.

- Liu, R. y Lal, R. (2015). Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic production. *Science of the Total Environment*, 514: 131-139.
- Londoño Urrea, S. A. (2023). *Síntesis y caracterización de nanopartículas de almidón (de mango y maíz) obtenidos por medio de nanoprecipitación para su uso como floculante* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).
- Manríquez Ruiz, A. R. (2017). Desarrollo de un modelo de estimación de dosis de zinc en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.).
- Marcano, A. E., Rodríguez, J. C., & Mohsin, M. (2003). Efecto del azufre elemental sobre el pH y la solubilidad de algunos nutrimentos en fosfocomposts. *Interciencia*, 28(9), 504-511.
- Méndez
- Méndez-Argüello, B., Vera-Reyes, I., Mendoza-Mendoza, E., García-Cerda, L.A., Puente-Urbina, B.A., & Lira-Saldivar, R.H. (2016). Promoción del crecimiento en plantas de *Capsicum annuum* por nanopartículas de óxido de zinc. *Nova Scientia*, 8(17), 140-156.
- Mukherjee, A., Peralta-Videa, J.R. Bandyopadhyay, S. Rico, C.M., Zhao, L. y Gardea-Torresdey, J.L. (2014). Physiological effects of nanoparticulate ZnO in green peas (*Pisum sativum* L.) cultivated in soil. *Metallomics*, 6: 132-138.
- Munguía-Aldama, J., Sánchez-Plata, F., Vizcarra-Bordi, I., & Rivas-Guevara, M. (2015). Estrategias para la producción de maíz frente a los impactos del cambio climático¹. *Revista de Ciencias Sociales*, 21(4), 538-547.
- Ochoa, I., & Yestin, Z. (2024). Manejo de Plagas de Importancia Económica en el Cultivo de Maíz en la CDMX.
- Panwar, J., Jain, N., Bhargaya, A., Akhtar, M.S. y Yun, Y.S. (2012). Positive effect of zinc oxide nanoparticles on tomato plants: A step towards developing nano-fertilizers. International Conference on Environmental Research and Technology (ICERT). Malaysia.
- Peng, C., Duan, D., Xu, C., Chen, Y., Sun, L., Zhang, H., Yuan, X., Zheng, L., Yang, Y., Yang, J., Zhen, X., Chen, Y., and Shi, J. (2015). Translocation and

biotransformation of CuO nanoparticles in rice (*Oryza sativa* L.) plants. *Environmental Pollution*. 197:99-107.

- Posada, F. C., González, L. A., & Ulrichs, C. (2010). Crecimiento de plantas de brócoli (*Brassica oleracea* L. var. Itálica) afectadas por exceso de zinc. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 4(2), 153-162.
- Prasad, T.N., Sudhakar, P., Sreenivasulu, Y., Latha, P., Munaswamy, V., Reddy, K.R. y Pradeep, T. (2012). Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth, and yield of peanuts. *Journal of Plant Nutrition*, 35:905-927.
- Ratto, S. E., & Miguez, F. H. (2006). Zinc en el cultivo de maíz, deficiencia de oportunidad. *Informaciones agronómicas*, 63, 8-15.
- Ratto, S., & Miguez, F. (2006). *Cinc en el cultivo de maíz, deficiencia de oportunidad. Informaciones Agronómicas*, 63, 8–15.
- Rehman, H., Aziz, T., Farooq, M., Wakeel, A. y Rengel, Z. (2012). Zinc nutrition in rice production systems: a review. *Plant and Soil*, 361: 203-226.
- Rivera-Gutiérrez, R. G., Preciado-Rangel, P., Fortis-Hernández, M., Betancourt-Galindo, R., Yescas-Coronado, P., & Orozco-Vidal, J. A. (2021). Nanopartículas de óxido de zinc y su efecto en el rendimiento y calidad de melón. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(5), 791-803.
- Roca, N., Pazos, M. S., & Bech, J. (2007). Disponibilidad de cobre, hierro, manganeso, zinc en suelos del NO argentino. *Ciencia del suelo*, 25(1), 31-42.
- Rizwan, M., Ali, S., Farooq Qayyum, M., Sik Ok, Y., Adrees, M., Ibrahim, M., Zia-Ur Rehman, M., Farid, M., Abbas, F. (2017). Effect of metal and metal oxide nanoparticles on growth and physiology of globally important food crops: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*. 322:2-16
- Rodríguez, M., & Florez, V. (2004). Elementos esenciales y beneficiosos. *Ferti-riego: Tecnologías y programación en agroplasticultura* pp.25-36. Guzmán, M. & López Gálvez, J. (Ed) ISBN: 84-96023-27-3.
- Rolón Galeano, M. P., Rasche Álvarez, J. W., Fatecha Fois, D. A., Leguizamón Rojas, C. A., Rolón Paredes, G. A., & Ortiz Grabski, C. E. A. (2023). Disponibilidad de Zinc en suelos de la región Oriental del

- Paraguay. *Investigación Agraria*, 25(1), 19-25. Rout, G. R., and Das, P. 2009. Effect of metal toxicity on plant growth and metabolism: I. Zinc. Springer, Dordrecht. 873-884.
- Quispe Challco, C. R. 2010. Nanotecnología en la agricultura. RITS [online]. n.5, pp. 72-73. ISSN 1997-4044.
 - Ruano, A., Poschenrieder, C. H., and Barceló, J. (1988). Growth and biomass partitioning in zinc-toxic bush beans. *Plant Nutr.* 11 (5):577–588.
 - Santillán Fernández, A. (2022). *La identidad cultural del cultivo de maíz en México: importancia y retos ante la apertura comercial de transgénicos* (Doctoral dissertation, Universidad de Santiago de Compostela).
 - Sedghi, M., Hadi, M. y Toluie, S.G. (2013). Effect of nano zinc oxide on the germination parameters of soybean seeds under drought stress. *Annals of West University of Timișoara, Ser. Biology*, 16: 73-78.
 - Selva, V. (2015). El maíz necesita zinc. www.stoller.com.ar
 - Selva, V., & SA, S. A. (2011). El maíz necesita Zinc. *Departamento Técnico, Stoller Argentina SA*.
 - 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.
 - SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2018). Aptitud agroclimática del maíz en México. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/422297/12_Aptitud_agroclim_tica_de_M_xico_de_diciembre__2018.pdf
 - SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2023). Cierre de la producción agrícola por cultivo. Disponible en: http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=215.