

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Aplicación de Nanopartículas de ZnO y de MgO para Determinar su Efecto en
Plantas de Maíz Cultivadas en Invernadero

Por:

MANUEL SÁENZ ALARCÓN

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Aplicación de Nanopartículas de ZnO y de MgO para Determinar su Efecto en
Plantas de Maíz Cultivadas en Invernadero

Por:

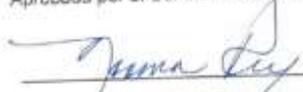
MANUEL SÁENZ ALARCÓN

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Aprobada por el Comité de Asesoría:


Dra. Norma Angélica Ruiz Torres
Asesor Principal


Dr. Froylán Rincón Sánchez
Coasesor


Dr. Francisco Javier Sánchez Ramírez
Coasesor


Dr. Jerónimo Laderos-Figueroa
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México.
Diciembre, 2022



Derechos de Autor y Declaración de no plagio

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y 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, gráficas, 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 el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Por lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.

Autor principal



Manuel Sáenz Alcón

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a:

Con todo el amor y cariño para mis padres, **Manuel Abelardo Sáenz Terrazas y Angélica María Alarcón Carreón**, quienes me han apoyado infinitamente dándome consejos, con sus palabras de aliento y amor incondicional.

Para mis queridos hermanos, **Alejandro y Alan Sáenz Alarcón**, los cuales me motivan a seguir luchando cada día por mis sueños y a seguir adelante cumpliendo todas mis metas.

Con cariño para una persona muy especial en mi vida que cada día me motiva a seguir creciendo de una manera maravillosa dándome sus consejos además de estar siempre para mí en todo momento con la que siempre estaré agradecido, a ti **Alejandra Martínez Limón** infinitas gracias.

A mi hermosa **familia**, quienes me dieron todo su gran apoyo incondicional dándome grandes consejos para poder realizar esta gran carrera y cumplir este sueño.

AGRADECIMIENTOS

Primero que nada, quiero dar gracias a **Dios**, por siempre bendecirme y guiarme toda mi vida y sobre todo durante este gran proyecto. Por nunca dejarme solo ante todas las adversidades que se pudieron en mi camino. Gracias a todas sus bendiciones y a la sabiduría que me brindaste para poder llevar a cabo todas mis actividades de la mejor manera.

A mi **Alma Terra Mater**, por abrirme las puertas de esta gran casa de estudios donde adquirí grandes conocimientos durante estos años dándome las herramientas necesarias para forjarme y salir adelante profesionalmente en la vida.

A mis **Profesores y al Departamento de Fitomejoramiento**, por haberme brindado gran parte de su tiempo, conocimiento y paciencia durante toda mi carrera universitaria.

A la **Dra. Norma Angélica Ruiz Torres**, por permitirme realizar este gran proyecto en base a todos sus conocimientos y experiencia, por toda la confianza brindada durante este tiempo para poder llevar a cabo todas estas actividades y por los grandes consejos compartidos.

A mis **Amigos**, los cuales me dieron un gran apoyo durante este tiempo dándome sus consejos, gracias por estar ahí en las buenas y en las malas.

ÍNDICE DE CONTENIDO GENERAL

ÍNDICE DE CUADROS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN.....	x
I. INTRODUCCIÓN	1
1. Objetivo general	2
1.2. Objetivos específicos	2
1.3. Hipótesis	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 ¿Que son las nanopartículas (NPs)?	3
2.2 Aplicación de las nanopartículas.....	3
2.3 Aplicación de nanopartículas en la agricultura.....	4
2.4 Efectos del zinc en el metabolismo de las plantas.....	5
2.5 Efecto del magnesio en el metabolismo de las plantas	5
2.6 Deficiencia del zinc	6
2.7 Toxicidad del zinc	6
2.8 Deficiencia de magnesio.....	7
2.9 Toxicidad por magnesio.....	7
2.10 Nanopartículas de zinc aplicadas en la germinación	7
2.11 NPsZnO aplicadas en plántula.....	8
2.12 Nanopartículas de zinc aplicadas a plantas	8
2.13 Trabajos realizados con NPsMgO	8
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	10
3.1 Localización	10
3.2 Material genético.....	10
3.3 Diseño experimental	10
3.4 Modelo estadístico	10
3.5 Preparación de macetas	11
3.6 Siembra y manejo nutricional.....	11
3.7 Variables agronómicas evaluadas	12
3.7.1 Altura de planta	12
3.7.2 Longitud de radícula	12

3.7.3 Número de hojas	12
3.7.4 Hojas liguladas	12
3.8 Variables Fisiológicas	12
3.8.1 Contenido relativo de clorofila	12
3.8.2 Peso fresco de tallo y hojas.....	12
3.8.3 Peso seco de tallo y hojas	13
3.8.4 Peso fresco de raíz.....	13
3.8.5 Peso seco de raíz	13
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	14
V. CONCLUSIONES.....	26
VI. BIBLIOGRAFÍA	27

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Composición de soluciones madre para preparar Hoagland.	11
Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza para variables agronómicas evaluadas en plantas de maíz (<i>Zea mays</i>) con aplicaciones de NPsZnO y NPsMgO.	15
Cuadro 3. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variable peso fresco y seco de raíz y de tallo en plantas de maíz (<i>Zea mays</i>) con aplicaciones de NPsZnO y NPsMgO.	15
Cuadro 4. Cuadrados medios del análisis de varianza del contenido de clorofila en plantas de maíz (<i>Zea mays</i>) aplicando NPsZnO y NPsMgO.	16
Cuadro 5. Comparación de medias de variables agronómicas por tipo de NP en plantas de maíz (<i>Zea mays</i>) aplicando NPsZnO y NPsMgO.....	17
Cuadro 6. Comparación de medias de peso fresco y seco de raíz y tallo por tipo de NP en plantas de maíz (<i>Zea mays</i>) aplicando NPsZnO y NPsMgO.	18
Cuadro 7. Comparación de medias de variables agronómicas por concentración en plantas de maíz (<i>Zea mays</i>) aplicando NPsZnO y NPsMgO.	19
Cuadro 8. Comparación de medias de las variables peso fresco y seco de raíz y tallo por concentración en plantas de maíz (<i>Zea mays</i>) aplicando NPsZnO y NPsMgO.....	20
Cuadro 9. Comparación de medias del contenido de clorofila por fecha en plantas de maíz (<i>Zea mays</i>) aplicando NPsZnO y NPsMgO.....	21
Cuadro 10. Comparación de medias del contenido de clorofila por tipo de NP en plantas de maíz (<i>Zea mays</i>) aplicando NPsZnO y NPsMgO.	24
Cuadro 11. Comparación de medias del contenido de clorofila por concentración en plantas de maíz (<i>Zea mays</i>) aplicando NPsZnO y NPsMgO.	25

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Interacción entre NP*CONC en la variable peso seco de tallo	20
Figura 2. Interacción entre FECHA*NP*CONC en la variable contenido de clorofila evaluada en la parte media de las hojas.	23

RESUMEN

El presente trabajo se llevó a cabo con el objetivo de determinar el efecto de las nanopartículas de óxido de zinc (NPsZnO) y de óxido de magnesio (NPsMgO), en el contenido relativo de clorofila y variables agronómicas y fisiológicas, en plantas de maíz (*Zea mays*) en condiciones de invernadero.

Para este estudio se utilizaron bolsas de polietileno negro de 5 L de capacidad, como sustrato se usó una mezcla de vermiculita y perlita 1:1 (v/v) con saturación de agua, colocando 2 semillas de maíz por bolsa, a una distancia de 20 cm entre cada una, evaluando 4 concentraciones (0, 200, 500 y 1000 ppm), con cinco repeticiones cada uno. Para la nutrición de las plantas se utilizó una solución nutritiva Hoagland, eliminando el nutriente aplicado en forma de nanopartícula, aplicando 50 ml por maceta de la nanopartícula correspondiente una vez por semana.

El experimento se estableció en un diseño completamente al azar con arreglo factorial, utilizando dos tipos de nanopartículas (NPsZnO o NPsMgO) como parte de la nutrición suministrada semanalmente. Las variables que se evaluaron fueron: altura de planta, peso fresco y seco de biomasa (tallo), peso fresco y seco de raíz, y contenido relativo de clorofila. Para analizar los datos se utilizó un análisis de varianza y una comparación de medias con la Prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), para lo cual se utilizó el programa estadístico SAS versión 9.4.

Aplicar la solución nutritiva Hoagland y la suspensión con NPsZnO promovió mayor longitud de radícula, así como también mayor peso fresco y seco del tallo; en ambos casos, se obtuvieron mejores resultados en comparación con NPsMgO. Por otra parte, la concentración con 200 ppm superó estadísticamente a las demás concentraciones en las variables agronómicas. La variable contenido relativo de clorofila mostró que al usar NPsZnO se obtiene mayor cantidad de clorofila en el ápice de las hojas, mientras que en la fecha julio23 se obtuvo una diferencia estadísticamente superior a las demás.

Palabras clave: Nanopartículas, óxido de zinc, óxido de magnesio, clorofila.

I. INTRODUCCIÓN

La nanotecnología (NT) es una disciplina relativamente nueva con avances fundamentales en el diseño de materiales usados en la física, química, medicina, medio ambiente, biología molecular, industria química, etc., con lo cual se pretende cubrir las necesidades de las personas de una forma más eficiente gracias al uso y aplicación de las nanopartículas (NPs).

En la agricultura es necesario tomar en cuenta productos con ingredientes activos con un tamaño nanométrico como lo son las nanopartículas (NPs), para que estos puedan actuar de una manera más eficiente, minimizando las pérdidas al momento de ser aplicados (Ruíz-Torres *et al.*, 2016).

En la agroindustria, la NT pudiera tener un efecto significativo durante los próximos años; se puede utilizar para mejorar la explotación de los recursos agroindustriales, centrándose en las propiedades específicas de los nanomateriales con el potencial de revolucionar el sector agrícola (Sabourin y Ayande, 2015).

En un futuro, la NT tendrá efecto en diferentes sectores, sustituyendo diversos productos o servicios que tienen severas consecuencias sobre el ambiente, y que además son de lenta absorción, así como de alta residualidad.

En este estudio se evaluó el efecto de las NPs de óxido de zinc (NPsZnO) y de óxido de magnesio (NPsMgO) en variables agronómicas y fisiológicas de maíz cultivado en sustrato bajo condiciones de invernadero.

1. Objetivo general

- Evaluar el efecto de la aplicación al sustrato de suspensiones con nanopartículas de óxido de zinc (NPsZnO) y de óxido de magnesio (NPsMgO) a diferentes concentraciones en la respuesta de variables agronómicas y fisiológicas, en plantas de maíz híbrido (RX-715) cultivado en invernadero.

1.2. Objetivos específicos

- Conocer la respuesta de plantas de maíz cultivadas en invernadero a la aplicación de suspensiones con NPsMgO o NPsZnO al sustrato, a través de la evaluación de variables fisiológicas y el contenido relativo de clorofila.
- Conocer la respuesta de variables agronómicas en plantas de maíz cultivadas en invernadero a la aplicación de suspensiones con NPsMgO o NPsZnO al sustrato.

1.3. Hipótesis

- H_i = La aplicación de suspensiones con diferentes concentraciones de NPsMgO o de NPsZnO al sustrato, modifica la expresión de variables agronómicas en plantas de maíz, y promueve los procesos fisiológicos incrementando el índice relativo de clorofila mostrando diferencias significativas entre concentraciones.
- H_0 = La aplicación de suspensiones con diferentes concentraciones de NPsMgO o de NPsZnO aplicadas al sustrato, no mejora la expresión de variables agronómicas en plantas de maíz, ni promueve los procesos fisiológicos, reduciendo el índice relativo de clorofila, mostrando respuestas similares entre concentraciones.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ¿Que son las nanopartículas (NPs)?

Según Pastelín-Solano *et al.* (2020), el término nanopartículas (NPs) significa pequeños gránulos (1-100 nm) con propiedades diferentes a su forma original, siendo de origen sintético o natural. Su uso dentro del área de los nanofertilizantes, han mostrado propiedades sobresalientes (Mastronardi *et al.*, 2015). Esta tecnología va encaminada a utilizar menos contaminantes como lo son los fertilizantes y pesticidas sintéticos, además se busca aumentar el rendimiento y crecimiento de las plantas (Servin *et al.*, 2015).

Rocha (2015) indica que los materiales para preparar NPs incluyen óxidos metálicos, cerámicas, silicatos, materiales magnéticos, carbono, lípidos, polímeros, dendrímeros, emulsiones, puntos cuánticos semiconductores y similares. Además, debe tenerse en cuenta que cuando se presentan los materiales en forma nanométrica, se comportan de manera diferente en comparación con el mismo material, en una escala mayor, ya sea microscópica o macroscópica.

Las NPs de origen natural se producen por reacciones fotoquímicas, incendios forestales, erupciones volcánicas, plantas y animales e incluso surgen de los microorganismos. Gracias al desarrollo de las nanopartículas provenientes de plantas y microorganismos, los científicos se han visto interesados en su producción, debido a su fácil proceso de producción y naturaleza ecológica (Ramos *et al.*, 2021).

2.2 Aplicación de las nanopartículas

En la actualidad, la nanotecnología (NT) y todos sus campos de aplicación han surgido como estrategias inteligentes para resolver problemas específicos, a través del diseño de nuevos materiales que satisfagan las necesidades especiales en diferentes campos, desde la catálisis industrial, hasta la biomedicina (Velásquez *et al.*, 2015).

Existen diversas aplicaciones de las NPs, en biología, agricultura, salud humana y nutrición animal, entre otras. López-Mora *et al.* (2018) señalan que la nutrición animal se ha visto favorecida con el uso de NPs, ya que proporcionan mayor incremento en la digestibilidad de la grasa y la proteína cruda, así como mejor

crecimiento de los animales. Dentro del área de salud humana las NPs por sus dimensiones pueden entrar en las células y sus diferentes compartimientos teniendo la capacidad de combatir células malignas (Álvarez y López, 2012). Cuervo-Osorio *et al.* (2020) mencionan que las NPs de plata han demostrado tener la capacidad de ser antimicrobianas y bactericidas ya que pueden atacar virus, bacterias y hongos. Las NPs también pueden ser utilizadas como filtros para eliminar bacterias y aniones en aguas de consumo humano (Talavera *et al.*, 2018).

2.3 Aplicación de nanopartículas en la agricultura

En lo que respecta a la agricultura moderna, se han realizado investigaciones relacionadas con este tipo de material (NPs), y el aumento significativo de informes de resultados de investigación en este campo se debe a su uso para aumentar la posibilidad de producción de alimentos. Algunas investigaciones muestran que la aplicación de NPs metálicas tiene un efecto positivo en el crecimiento de las plantas, mientras que otros reportes muestran inhibición y fitotoxicidad. Actualmente el uso de esta tecnología brinda la posibilidad de generar nanofertilizantes y promotores del crecimiento con el fin de satisfacer la demanda de alimentos básicos a nivel mundial (Lira *et al.*, 2018).

La NT tiene una amplia variedad de aplicaciones en sistemas agrícolas, ofreciendo el potencial de incrementar significativamente su productividad y eficiencia al reducir costos y la cantidad de agroquímicos aplicados. Las NPs metálicas de zinc, cobre y óxido de hierro, ya sean puras o mezcladas con plata, se han estudiado a nivel mundial por su potencial agrícola como promotores del crecimiento, nanofertilizantes y agentes antibacterianos (Méndez *et al.*, 2016).

Las NPs también han sido utilizadas para disminuir los niveles de plaguicidas formulándolos de manera que actúen más eficientemente, por lo que en campo se utilizan menores dosis que comúnmente se aplicaría en la agricultura tradicional. Se ha demostrado que encapsular ingredientes activos en NPs puede aumentar la efectividad de sus componentes químicos, ya que reducen su volatilización, lixiviación y el uso de estos nanoproductos puede reducir la toxicidad y contaminación de los agroecosistemas por pesticida sintéticos (Lira *et al.*, 2018).

También se han evaluado NPs para generar tolerancia al estrés en las plantas, germinación de semillas, y como compuestos orgánicos para aumentar los niveles de clorofila a, clorofila b, carotenos totales, y para incrementar la actividad de enzimas antioxidantes (López *et al.*, 2019).

El aumento de los niveles de área foliar, número de hojas, contenido de clorofilas, actividad nitrato reductasa y rendimiento se ven claramente mejoradas con el uso de NPs de plata, con una concentración de 25 a 50 mgkg⁻¹ (Das *et al.*, 2018).

2.4 Efectos del zinc en el metabolismo de las plantas

El zinc (Zn) no forma parte de ningún componente estructural, sino de muchas enzimas, como la anhidrasa carbónica, deshidrogenasa láctica, deshidrogenasa alcohólica, aldolasa, deshidrogenasa glutámica, carboxilasa pirúvica y ribonucleasas. También desempeña un papel importante en regular el nitrógeno, división celular, fotosíntesis y la síntesis de auxinas (Rout y Das, 2003). Una de las funciones más importantes del Zn es la de equilibrar la expresión génica al convertirse en parte de factores de transcripción, varios de los cuales están involucrados en la regulación de procesos biológicos, como el desarrollo de flor, morfogénesis regulada por la luz y respuestas a patógenos (Hanafy-Ahmed *et al.*, 2012).

Marschner (2002) señala que este elemento es absorbido por las plantas como un compuesto quelante a través de la raíz o vías foliares, en el transporte de larga distancia (xilema), se combina con ácidos orgánicos o actúa como catión divalente libre y en la savia del floema se puede encontrar en concentraciones muy elevadas, unido a solutos orgánicos de bajo peso molecular.

2.5 Efecto del magnesio en el metabolismo de las plantas

El papel más importante del magnesio (Mg) es la de átomo central en la molécula de clorofila. La clorofila es el pigmento que da a las plantas su color verde y lleva a cabo el proceso de la fotosíntesis; también interviene en la activación de un sinnúmero de enzimas necesarias para su desarrollo y contribuye a la síntesis de proteínas. El Mg mejora la eficiencia nutricional de las plantas cultivadas en suelos ácidos (Ross, 2004).

Bennett (1993) indica que este nutriente también funciona en los cloroplastos como parte de las reacciones redox y la transferencia de electrones.

2.6 Deficiencia del zinc

La deficiencia de zinc en las plantas es un problema mundial que conduce a una disminución de la calidad nutricional de muchos cultivos, incluidos los cereales (White y Broadley, 2005).

Black *et al.* (2008) indican que la deficiencia de este elemento en las plantas se presenta como trastornos en el desarrollo y crecimiento.

Los síntomas visuales característicos de la deficiencia de Zn en las plantas, son entrenudos cortos y menor índice foliar, que están relacionados con trastornos del metabolismo del ácido indolacético (Kirkby y Römheld, 2007).

Espósito *et al.* (2010) afirman que la deficiencia de zinc en maíz afecta de manera considerable el crecimiento del cultivo durante su periodo crítico para definir su rendimiento. La deficiencia de zinc puede provocar el amarillamiento de las hojas, un crecimiento deficiente de las plantas y una reducción significativa de las cosechas. Este nutriente juega un papel importante como catalizador y regulador del metabolismo de la planta. La deficiencia de Zn se puede atribuir a un exceso de fertilizante fosfatado y existe un efecto antagonista entre el fósforo (P) y el Zn a nivel de raíces y formación de fosfato de zinc (Bartoni, 1990).

2.7 Toxicidad del zinc

Sagardoy *et al.* (2008) mencionan que cuando una planta se encuentra con un exceso de zinc disminuye la absorción de N, Mg, Mn y K, esto considerando que la concentración de Ca y P aumenta solamente en la raíz. En muchos casos, el exceso de Zn producirá una reactivación oxidativa y / o desplazamiento de otros metales del sitio de activación de la síntesis de proteínas. La toxicidad puede causar clorosis de las hojas jóvenes, así como deficiencia de hierro y magnesio debido al reemplazo. Esto se debe a que estos tres metales tienen iones divalentes; otro síntoma común es la reducción del contenido de agua en los tejidos, además de cambiar las concentraciones de P y Mg en los tejidos de la planta (Kramer *et al.*, 2007).

Los síntomas de toxicidad por zinc incluyen clorosis y crecimiento más lento de las plantas; actúa inhibiendo la fijación de CO₂, el transporte de carbohidratos en

el floema y cambiando la permeabilidad de las membranas celulares (Efroymsen *et al.*, 1997).

2.8 Deficiencia de magnesio

La deficiencia de magnesio en el cultivo de maíz produce clorosis intervenal en las hojas viejas, además de hojas jóvenes amarillentas, bronceadas o rojizas jóvenes con deficiencia extrema (Jobes, 1998).

Morante (2014) señala que la deficiencia de Mg puede producir fecundación deficiente e irregularidades en las mazorcas como: mazorcas sin granos y mazorcas torcidas. El Mg tiene movilidad en las plantas, así que los síntomas de su deficiencia aparecen primero en las hojas más viejas: se tornan amarillas con venas verdes (clorosis intervenal). La deficiencia de Mg con frecuencia es provocada por la falta de aplicación, pero también puede ser inducida si existen altos niveles de calcio, de potasio o de sodio en el sustrato.

2.9 Toxicidad por magnesio

No hay síntomas específicos de toxicidad, pero los niveles altos de Mg pueden causar un desequilibrio de calcio y potasio, lo que reduce el desarrollo (Jones, 1998).

Morales (2005) informa que el exceso de Mg disminuye la absorción del mismo, además, genera estrés, lo que produce una reducción del crecimiento vegetal sobre todo en el área foliar, lo que puede deberse a una mayor síntesis de ácido abscísico y una disminución del contenido de citoquininas (Azcon-Bieto y Talon, 1996).

2.10 Nanopartículas de zinc aplicadas en la germinación

Un estudio realizado por García (2019), muestra que las NPs de Zinc tuvieron una respuesta mucho mayor sobre las plantas de chile habanero (*Capsicum chinense*) que no fueron tratadas con nanopartículas, esto con una concentración de 100 y 200 ppm.

Estrada (2019) afirma que encontró un incremento significativo en la germinación de las semillas de maíz nativo (*Zea mays L.*) en pruebas de germinación con el uso de las NPsZnO, siendo más notorio en la prueba de envejecimiento acelerado (90%), en contraste con el grupo Control (68%).

2.11 NPsZnO aplicadas en plántula

Las NPsZnO aplicadas a plántulas de maíz, mejoraron de manera significativa algunas variables como la longitud de la plúmula, el diámetro de la plúmula, la longitud de la raíz, y el número de raíces secundarias. La espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier con reflexión total atenuada (FTIR-ATR) confirmó una mayor producción de biomoléculas (carbohidratos, proteínas, y lípidos) y de las moléculas estructurales (celulosa, hemicelulosa, y lignina), en las plántulas tratadas con las NPsZnO (Estrada, 2019).

Se ha informado que las NPsZnO aumentan el contenido de ácido indolacético en raíces y yemas apicales, lo que promueve el crecimiento de las plantas (Shiga y Natarajan, 2014).

2.12 Nanopartículas de zinc aplicadas a plantas

El efecto de las NPsZnO sobre el crecimiento de las plantas también puede estar relacionado con la actividad del Zn como precursor para producir auxina, que promueve el alargamiento y la división celular (Rehman *et al.*, 2012).

Las NPsZnO dopadas de plata y aplicadas en el follaje, mostraron un crecimiento significativamente mayor, además de un aumento en la producción de biomasa en plantas de chile (Méndez-Argüello *et al.*, 2015). Asimismo, Prasad *et al.* (2012) informaron que en dosis bajas de NPsZnO se encontró influencia significativa en el crecimiento y el desarrollo, reflejada en un mayor contenido de biomasa en plantas de cacahuate (*Arachis hypogaea*).

2.13 Trabajos realizados con NPsMgO

Un estudio realizado con semillas de tabaco a una concentración de 250 mg/ml no mostró un aumento considerable en la germinación, de igual forma no se presentó ningún síntoma toxicológico en esta concentración. Por otra parte, el índice de clorofila aumentó notablemente con estos niveles de NPsMgO con aplicación durante 30 días. Además, se observó un crecimiento de las plantas junto con una mayor actividad de enzima peroxidasa y un alto contenido de Mg en los tejidos vegetales expuestos a NPsMgO. La microscopía electrónica de barrido y la observación de la sección de parafina muestran que las NPsMgO no afectan la estructura y las células de los tejidos vegetales (Cai *et al.*, 2018).

Jayarambabu *et al.* (2016) indicó que la aplicación de NPsMgO estimularon la germinación de semillas de maíz, mostrando una mayor germinación en concentraciones de 100 mgL⁻¹.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización

El presente estudio se llevó a cabo en el invernadero número 1 del Departamento de Fitomejoramiento, localizado en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), con coordenadas 25°21'19" latitud norte y 101°01'52" longitud oeste y una altitud de 1780 msnm en Buenavista; Saltillo, Coahuila México, durante el periodo de verano de 2021.

3.2 Material genético

Para este estudio se utilizó semillas de maíz (*Zea mays*) híbrido RX-715 de ciclo intermedio precoz utilizado para forraje y grano. Su grano es de tipo semidentado y de color amarillo.

3.3 Diseño experimental

Se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo factorial, con dos tipos de nanopartículas (ZnO y MgO), cinco repeticiones y cuatro concentraciones, después se realizó, un análisis de varianza y una comparación de medias con la Prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), para lo cual se utilizó el programa estadístico SAS versión 9.4.

3.4 Modelo estadístico

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + E_{ijk}$$

Dónde:

i = Tipo de nanopartícula (ZnO o MgO).

j = Concentraciones.

k = Repeticiones.

μ = Media general.

α_i = Efecto del tipo de nanopartículas.

β_j = Efecto de las concentraciones.

$\alpha\beta_{ij}$ = Efecto en conjunto de las nanopartículas y las concentraciones.

E_{ijk} = Error experimental.

3.5 Preparación de macetas

Se utilizaron macetas de polietileno negro de 5 L de capacidad, las cuales fueron llenadas con una mezcla de vermiculita y perlita 1:1 (v/v). Posteriormente, se distribuyeron en una cama con 5 plantas por concentración y a una distancia de 20 cm entre planta y planta.

3.6 Siembra y manejo nutricional

La siembra se realizó con el sustrato humedecido a saturación y se colocaron 2 semillas por maceta en el centro de esta, una vez germinadas se eliminó una de las plántulas.

Para la nutrición de las plantas se utilizó la solución nutritiva Hoagland, eliminando el nutriente aplicado en forma de nanopartícula. Cada planta recibió dosis de NPsMgO o de NPsZnO, de acuerdo con la concentración correspondiente (0, 200, 500, 1000 ppm), aplicando 50 ml por maceta de la NPs correspondiente, una vez por semana.

Cuadro 1. Composición de soluciones madre para preparar Hoagland.

Símbolo	Compuesto	Concentración
A	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$	118 g/500mL
B	KNO_3	50.5 g/500mL
C	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	123.25 g/500mL
D	$\text{KH}_2 \text{PO}_4$	68 g/500mL
E	Quelato de Fe ($\text{FeSO}_4 + \text{Na}_2 \text{EDTA}$)	1.25 g/250mL
F	Micronutrientes	(0.715 g $\text{H}_3\text{BO}_3 + 0.055 \text{ g ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + 0.0225 \text{ g H}_2\text{MoO}_4 + 0.0225 \text{ g CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ en 250 mL de agua destilada).

3.7 Variables agronómicas evaluadas

3.7.1 Altura de planta (AP)

A los 63 días después de la siembra se midió la altura de la planta (AP), con una regla de 50 cm. Para ello, se consideró desde la base del tallo hasta el punto apical más alto.

3.7.2 Longitud de radícula (LR)

Al término del estudio se extrajo la raíz del sustrato colocándola sobre una superficie plana para posteriormente medirla con la ayuda de una regla.

3.7.3 Número de hojas (NHOJAS)

Cuando las plantas aún se encontraban dentro de la maceta, se contabilizaron la cantidad de hojas verdes que tenía cada planta al momento de la evaluación.

3.7.4 Hojas liguladas (HLIG)

Se contaron todas las hojas con lígula, verdes y con color marrón, para determinar si alguna concentración influía en la cantidad de hojas por planta.

3.8 Variables Fisiológicas

3.8.1 Contenido relativo de clorofila

Después de la primera aplicación de NPsZnO o de NPsMgO, se inició con la determinación del contenido relativo de clorofila, con un SPAD 502, el cual establece el contenido relativo de clorofila en las hojas (relacionado con el color verde). Este valor se calcula con base a la cantidad de luz transmitida en las dos longitudes de onda, donde la absorbancia de la luz es diferente. En cada planta se tomaron tres lecturas en la última hoja completamente desarrollada y ligulada denominándolas de la siguiente manera: **CLOBA** = Contenido de clorofila en la base de la hoja; **CLOME** = Contenido de clorofila en la parte media de la hoja; **CLOAPI** = Contenido de clorofila en el ápice de la hoja;

3.8.2 Peso fresco de tallo y de hojas (PFTALLO)

En cada planta se separó la parte aérea (verde) de la raíz, dejando solamente el tallo y las hojas, las cuales se llevaron a una balanza analítica para determinar su peso en fresco en gramos (g).

3.8.3 Peso seco de tallo y de hojas (PSTALLO)

El tallo y las hojas de cada concentración se coloraron en una bolsa de papel estraza con orificios, las cuales fueron identificadas y colocadas dentro de una estufa de secado por 72 horas, a una temperatura de 72°C, al finalizar, se pesaron para obtener sus datos en gramos (g).

3.8.4 Peso fresco de raíz (PFRAÍZ)

Se eliminó el exceso de sustrato contenido entre la raíz, después se obtuvo su peso fresco en gramos (g) en una balanza semianalítica.

3.8.5 Peso seco de raíz (PSRAÍZ)

Para esta variable se utilizó una estufa de secado a 72°C, por 72 horas, donde se introdujo la raíz de cada una de las plantas en bolsas de papel estraza con pequeños orificios, para después de transcurrido el tiempo determinar su peso en gramos (g).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de varianza para las variables agronómicas (Cuadro 2), en la fuente de variación nanopartículas (NP) se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.01$) para la variable longitud de radícula (LR), mientras que para las variables número de hojas (NHOJAS), hojas liguladas (HLIG) y altura de planta (AP) no se encontraron diferencias estadísticas. En la fuente de variación concentraciones (CONC) se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.01$) en las variables NHOJAS, HLIG, y AP; además, de encontrar diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en la variable LR. Por otra parte, en la fuente de variación interacción de nanopartículas x concentraciones (NP*CONC) no se encontraron diferencias significativas en ninguna de las variables.

Los resultados en el análisis de varianza para peso fresco y peso seco de raíz y de tallo (Cuadro 3), muestran para la variable peso fresco del tallo (PFTALLO) diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en la fuente de variación NP y diferencias ($P \leq 0.01$) en la fuente de variación CONC. La variable peso fresco de raíz (PFRAÍZ) no presentó diferencias significativas en las fuentes de variación NP, TRAT, NP*TRAT. Dentro de la variable peso seco del tallo (PSTALLO), se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.01$) en cada una de las fuentes de variación (NP, TRAT y NP*TRAT), mientras que para la variable peso seco de raíz (PSRAÍZ), no se obtuvieron diferencias significativas.

Con respecto a los resultados del análisis de varianza para contenido de clorofila (Cuadro 4), la fuente de variación FECHAS presentó diferencias significativas ($P \leq 0.01$) en cada una de las variables evaluadas (CLOBA, CLOME, CLOAPI). La fuente de variación NP no mostró diferencias significativas en las variables CLOBA y CLOME, en comparación con la variable CLOAPI que presentó diferencias significativas ($P \leq 0.05$). Por otra parte, la fuente de variación TRAT mostró diferencias significativas ($P \leq 0.01$) en las variables CLOBA y CLOAPI, a excepción de la variable CLOME, que presentó diferencias significativas ($P \leq 0.05$).

Cabe señalar que dentro de las fuentes de variación donde existe alguna interacción (FECHA*NP, FECHA*CONC, NP*CONC) no se encontraron diferencias significativas, excepto en la interacción FECHA*NP*CONC donde se encontró que la variable CLOME presentó diferencias significativas ($P \leq 0.05$).

Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza para variables agronómicas evaluadas en plantas de maíz (*Zea mays*) con aplicaciones de NPsZnO y NPsMgO.

F.V.	G.L.	NHOJAS (número)	HLIG (número)	AP (cm)	LR (cm)
NP	1	1.02 ns	0.49 ns	0.13 ns	603.27 **
CONC	3	10.26 **	9.60 **	735.43 **	288.91 *
NP*CONC	3	0.25 ns	0.54 ns	72.09 ns	54.37 ns
Error	31	0.54	0.48	44.31	74.63
C.V.		7.27	8.77	15.21	20.87

**=Significativos ($P \leq 0.01$); *=Significativos ($P \leq 0.05$); NS= No significativo; F.V.= Fuente de variación; G.L.= Grados de libertad; NHOJAS= Número total de hojas; HLIG= Hojas liguladas; AP= Altura de planta; LR= Longitud de radícula; NP= Nanopartículas; CONC= Concentraciones; NP*CONC= Interacción de nanopartículas y concentraciones; C.V.= Coeficiente de variación.

Cuadro 3. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variable peso fresco y seco de raíz y de tallo en plantas de maíz (*Zea mays*) con aplicaciones de NPsZnO y NPsMgO.

F.V.	G.L.	PFTALLO (g)	PFRAÍZ (g)	PSTALLO (g)	PSRAÍZ (g)
NP	1	299.63 *	34.22 ns	10.51 **	0.04 ns
CONC	3	366.22 **	26.08 ns	4.71 **	0.14 ns
NP*CONC	3	44.47 ns	4.97 ns	2.96 **	0.13 ns
Error	31	50.33	11.40	0.42	0.17
C.V.		15.65	20.74	15.03	19.77

**=Significativos($P \leq 0.01$); *= Significativos ($P \leq 0.05$); NS= No significativo; F.V.= Fuente de variación; G.L.= Grados de libertad; PFTALLO= Peso fresco de tallo; PFRAÍZ= Peso fresco de raíz; PSTALLO= Peso seco de tallo; PSRAÍZ= Peso seco de raíz; NP= Nanopartículas; CONC= Concentraciones; NP*CONC= Interacción de nanopartículas y concentraciones; C.V.= Coeficiente de variación.

Cuadro 4. Cuadrados medios del análisis de varianza del contenido de clorofila en plantas de maíz (*Zea mays*) aplicando NPsZnO y NPsMgO.

F.V.	G.L.	CLOBA (SPAD)	CLOME (SPAD)	CLOAPI (SPAD)
FECHA	4	547.25 **	94.26 **	465.36 **
NP	1	16.66 ns	1.55 ns	33.13 *
CONC	3	97.64 **	36.83 *	81.83 **
FECHA*NP	4	13.32 ns	15.87 ns	15.67 ns
FECHA*CONC	12	6.75 ns	13.02 ns	8.32 ns
NP*CONC	3	31.51 ns	28.84 ns	15.59 ns
FECHA*NP*CONC	12	19.77 ns	23.42 *	13.83 ns
Error	480	15.67	12.17	8.48
C.V.		15.06	10.70	8.10

**= Significativos ($P \leq 0.01$); *= Significativos ($P \leq 0.05$); NS= No significativo; F.V.= Fuente de variación; G.L.= Grados de libertad; CLOBA= Contenido de clorofila en la base de la hoja; CLOME= Contenido de clorofila en la parte media de la hoja; CLOAPI= Contenido de clorofila en el ápice de la hoja; NP= Nanopartículas; CONC= Concentraciones; FECHA*NP= Interacción de las nanopartículas con respecto a la fecha; FECHA*CONC= Interacción de los concentraciones con respecto a la fecha; NP*CONC= Interacción de nanopartículas con las concentraciones; FECHA*NP*CONC= Interacción entre la fecha, nanopartículas y concentraciones; C.V.= Coeficiente de variación.

En la comparación de medias para variables agronómicas por tipo de NP (Cuadro 5), las variables NHOJAS, HLIG y AP no mostraron diferencias estadísticas. Por otra parte, la variable LR mostró diferencias estadísticas, las NPsMgO obtuvieron un valor relativamente bajo con 37.08 cm, en comparación con las NPsZnO que presentaron 45.48 cm.

Rathore y Tarafdar (2015) mencionaron que al aplicar NPsMgO de manera foliar en plantas de trigo, existió una mejora en la longitud y biomasa de la raíz, además se mejoró la cantidad de puntas de raíz, lo cual permite una mejor absorción de nutrientes como lo son Fe, Cu, Zn, P y Mg.

En un estudio realizado por Zhang *et al.* (2015), encontraron que al usar NPsZnO a una concentración de 1000 mg/l en cultivos de maíz (*Zea mays* L.) y pepino (*Cucumis sativus* L.), se observó una considerable reducción en la longitud de la raíz de 17% y un 51%, respectivamente. Esto indicó que al usar altas cantidades de NPsZnO se presentan reacciones de toxicidad en estos cultivos, lo cual repercute fuertemente en el rendimiento, esto se debe a la poca absorción de nutrientes.

Cuadro 5. Comparación de medias de variables agronómicas por tipo de NP en plantas de maíz (*Zea mays*) aplicando NPsZnO y NPsMgO.

Tipo de NP	NHOJAS (núm.)	HLIG (núm.)	AP (cm)	LR (cm)
MgO	10.05 a	7.84 a	44.25 a	37.08 b
ZnO	10.30 a	8.00 a	43.27 a	45.48 a
Media	10.17	7.92	43.74	41.39
Tukey	0.483	0.454	4.349	5.644

Valores con la misma literal en cada columna son estadísticamente iguales; NHOJAS= Numero de hojas; HLIG= Hojas liguladas; AP= Altura de planta; LR= Longitud de radícula; MgO= Nanopartículas de óxido de magnesio; ZnO= Nanopartículas de óxido de zinc.

Al realizar la comparación de medias de las variables peso fresco y seco de raíz y tallo por tipo de nanopartícula (Cuadro 6), se observó que solo existieron diferencias para Tallo; un PFTALLO mayor resultó al aplicar NPsZnO, obteniendo 47.85 g, siendo este valor superior y estadísticamente diferente con respecto a la concentración NPsMgO, que obtuvo 42.64 g. Para la variable PSTALLO las NPsZnO promovieron mayor acumulación de materia seca, con 4.93 g en comparación con las NPsMgO con 3.80 g. En la variable PSRAÍZ se encontraron diferencias numéricas, donde las NPsMgO obtuvieron 2.14 g, en comparación con 2.08 g que se obtuvo al aplicar NPsZnO.

Taherin *et al.* (2016) mencionan que al utilizar NPsZnO en plantas de maíz (*Zea mays*), se incrementó en un 63.8% y 69.7% el índice de materia seca aérea, así como el área foliar, respectivamente. Con base a estos resultados, se distingue que las NPsZnO mejoraron el crecimiento y el rendimiento del maíz, y pueden sustituir la fuente de Zn en soluciones nutritivas.

Cuadro 6. Comparación de medias de peso fresco y seco de raíz y tallo por tipo de NP en plantas de maíz (*Zea mays*) aplicando NPsZnO y NPsMgO.

Tipo de NP	PFTALLO	PFRAÍZ	PSTALLO	PSRAÍZ
	(g)	(g)	(g)	(g)
MgO	42.64 b	15.22 a	3.80 b	2.14 a
ZnO	47.85 a	17.29 a	4.83 a	2.08 a
Media	45.31	16.28	4.33	2.11
Tukey	4.635	2.206	0.425	0.273

Valores con la misma literal en cada columna son estadísticamente iguales; PFTALLO= Peso fresco del tallo; PFRAÍZ= Peso fresco de raíz; PSTALLO= Peso seco del tallo; PSRAÍZ= Peso seco de la raíz; MgO= Nanopartículas de óxido magnesio; ZnO= Nanopartículas de óxido zinc.

En el Cuadro 7 se presenta la comparación de medias de las variables agronómicas por concentración, se observó que las variables NHOJAS, HLIQ y AP resultaron estadísticamente iguales en las concentraciones con 200 ppm, 500 ppm y 1000 ppm, pero superiores estadísticamente al testigo que presentó el menor valor con 8.55, 6.33 y 30.27 cm, respectivamente. Por otra parte, en la variable LR el testigo (0 ppm) superó estadísticamente (48.23 cm), a la concentración con 500 ppm, que obtuvo 39.04 cm.

De acuerdo con el estudio de Tausef *et al.* (2021), en plantas de *Vigna unguiculata* afectadas por nematodos, encontraron que las NPsMgO a una concentración de 100 ppm con método de aplicación de baño de raíces, redujo la propagación de nematodos, además de incremento el crecimiento de las plantas aumentó el contenido de clorofila y de carotenoides, así como el índice de nitrógeno en las raíces y brotes.

En otro estudio, la aplicación foliar de NPsZnO a una concentración de 500 ppm en plantas de maíz (*Zea mays*), mejoró considerablemente la altura de planta, así como el rendimiento de planta y mazorca (Satdev *et al.*, 2020).

Cuadro 7. Comparación de medias de variables agronómicas por concentración en plantas de maíz (*Zea mays*) aplicando NPsZnO y NPsMgO.

CONC (ppm)	NHOJAS (núm.)	HLIG (núm.)	AP (cm)	LR (cm)
0	8.55 b	6.33 b	30.27 b	48.23 a
200	10.60 a	8.40 a	48.82 a	43.59 a b
500	10.70 a	8.40 a	47.83 a	35.39 b
1000	10.70 a	8.40 a	46.72 a	39.04 a b
Media	10.17	7.92	43.74	41.39
Tukey	0.911	0.856	8.191	10.631

Valores con la misma literal en cada columna son estadísticamente iguales; NHOJAS= Número de hojas; HLIG= Hojas liguladas; AP= Altura de planta; LR= Longitud de radícula.

La variable PFTALLO (Cuadro 8), muestra que las concentraciones con 200 ppm, 500 ppm y 1000 ppm son estadísticamente iguales, pero superaron a la concentración con 0 ppm, que obtuvo 35.95 g. Para la variable PFRAÍZ no se encontraron diferencias estadísticas entre las concentraciones, pero si existieron diferencias numéricas las cuales mostraron que la concentración 0 ppm (testigo) obtuvo el valor más alto con 18.82 g, el cual superó a la concentración con 500 ppm, que presentó 15.18 g. Para la variable PSTALLO la concentración con 200 ppm, fue estadísticamente superior a las concentraciones con 500 ppm y 1000 ppm, mientras tanto la concentración testigo mostró el valor más bajo con 3.37 g. Dentro de la variable PSRAÍZ no se encontraron diferencias estadísticas, pero si numéricas, donde la concentración con 0 ppm presentó un valor de 2.27 g, siendo este el más alto, con respecto a las demás concentraciones.

En un estudio realizado en plántulas de *Citrus máxima*, se encontró que, con concentraciones de 250, 500 y 1000 mg/l de NPsMgO, se obtuvo una buena translocación desde las primeras raíces hacia los brotes, sin embargo, se presentó una toxicidad severa de un fuerte estrés oxidativo (Xiaom *et al.*, 2019).

Méndez-Argüello *et al.* (2016) señalaron que al aplicar NPsZnO de manera foliar, a una concentración de 1.25 y 2.5 molar, mejoró la cantidad de biomasa, así como el crecimiento en plantas de *Capsicum annum*. Esto se debe a que el zinc promueve la división celular, así como la síntesis de auxinas.

Cuadro 8. Comparación de medias de las variables peso fresco y seco de raíz y tallo por concentración en plantas de maíz (*Zea mays*) aplicando NPsZnO y NPsMgO.

CONC (ppm)	PFTALLO (g)	PFRAÍZ (g)	PSTALLO (g)	PSRAÍZ (g)
0	35.95 b	18.82 a	3.37 c	2.27 a
200	49.05 a	15.96 a	5.08 a	2.14 a
500	49.44 a	15.18 a	4.56 ab	2.00 a
1000	45.88 a	15.43 a	4.20 b	2.04 a
Media	45.31	16.28	4.33	2.11
Tukey	8.730	4.156	0.801	0.515

Valores con la misma literal en cada columna son estadísticamente iguales; PFTALLO= Peso fresco del tallo; PFRAÍZ= Peso fresco de raíz; PSTALLO= Peso seco del tallo; PSRAÍZ= Peso seco de la raíz.

La Figura 1 muestra la interacción entre el tipo de nanopartícula y las diferentes concentraciones, se observó que al tratar las plantas de maíz con NPsZnO en cualquier concentración (200 ppm, 500 ppm y 1000 ppm), se mejoró considerablemente el peso seco de los tallos, sin embargo, en la concentración de 200 ppm, se obtuvo el mayor peso seco en comparación con todas las concentraciones donde se aplicó NPsMgO.

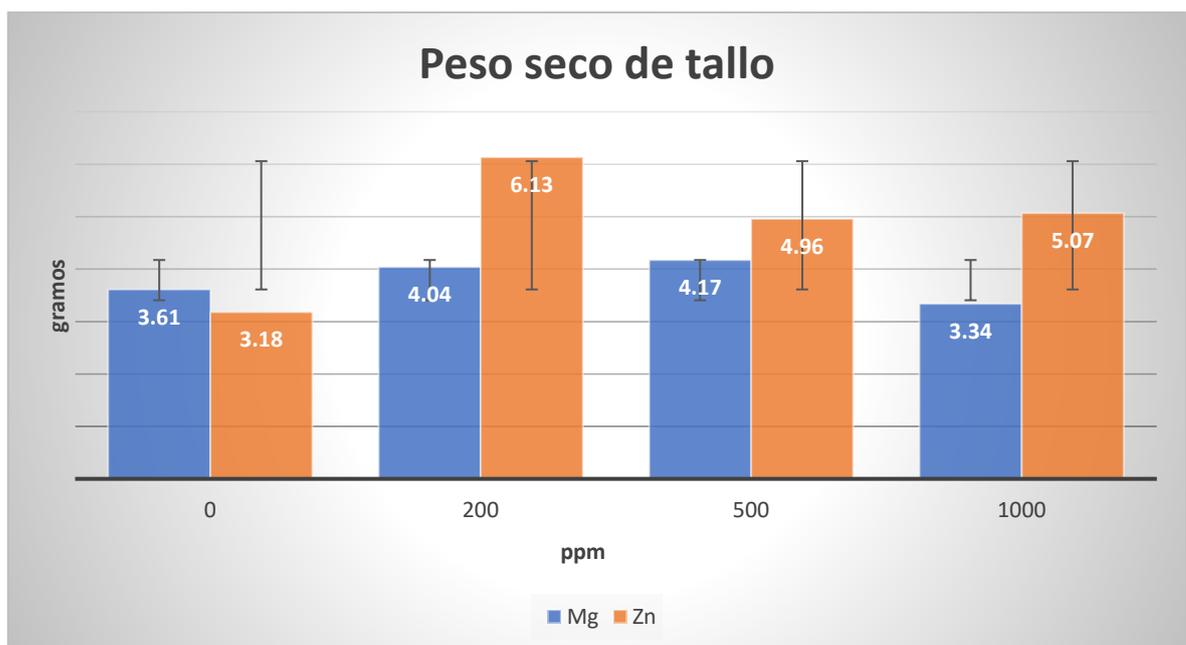


Figura 1. Interacción entre NP*CONC en la variable peso seco de tallo.

La acumulación de materia seca es uno de los parámetros que indica crecimiento de la planta, y está directamente relacionada con la fotosíntesis neta. De acuerdo con los resultados, sustituir la fuente del Zinc en la solución nutritiva con la NPsZnO, tuvo mejor efecto que sustituir el Mg con las NPsMgO.

En la comparación de medias de la variable contenido de clorofila en la fuente de variación fecha de evaluación (Cuadro 9), la variable CLOBA mostró que las fechas julio16 y julio23, son estadísticamente iguales con 28.15 y 28.96 SPAD, respectivamente, pero superiores a las demás fechas, mientras que, las fechas julio4 y julio30 con 25.20 y 26.10 SPAD son superiores a la fecha junio30, que solo mostró 22.65 SPAD. Por otra parte, la variable CLOME muestra que las fechas junio30, julio4, julio16 y julio30 son estadísticamente iguales, pero son inferiores al contenido de clorofila que se observó en la fecha julio23, la cual presentó 34.31 SPAD. En la variable CLOAPI la fecha junio30 presentó el contenido de clorofila más alto, con 38.94 SPAD, siendo este estadísticamente superior a los demás, mientras que las fechas julio23 y julio30 son estadísticamente iguales entre sí, con valores de 35.16 y 35.94 SPAD, respectivamente. El menor valor obtenido fue en la fecha julio16 con 33.20 SPAD.

Cuadro 9. Comparación de medias del contenido de clorofila por fecha en plantas de maíz (*Zea mays*) aplicando NPsZnO y NPsMgO.

FECHA	CLOBA (SPAD)	CLOME (SPAD)	CLOAPI (SPAD)
junio 30	22.65 c	32.47 b	38.94 a
julio 4	25.20 b	32.94 b	37.21 b
julio 16	28.15 a	31.72 b	33.20 d
julio 23	28.96 a	34.31 a	35.16 c
julio 30	26.10 b	32.07 b	35.93 c
Media	26.27	32.59	35.94
Tukey	1.533	1.351	1.128

Valores con la misma literal en cada columna son estadísticamente iguales; CLOBA= Contenido de clorofila en la base de la hoja; CLOME= Contenido de clorofila en la parte media de la hoja; CLOAPI= Contenido de clorofila en el ápice de la hoja.

Según Siddiqui *et al.* (2019), observaron que al aplicar NPsZnO en el cultivo de zanahoria (*Daucus carota*), se aumentó los niveles de clorofila, carotenoides y prolina, así como el crecimiento de las plantas.

Sin embargo, no en todos los estudios, el uso de NPsZnO genera resultados positivos. Por ejemplo, Wang *et al.* (2018) al aplicar NPsZnO en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*) inhibieron significativamente la longitud de la raíz y el crecimiento del fruto de tomate, así como el contenido de clorofila a y b. Además, otros parámetros de fluorescencia, como la eficiencia fotosintética también se vieron afectados.

Además de estudios donde el zinc inhibe o promueve efectos en el contenido de clorofila y el crecimiento de plantas, las NPsZnO pueden tener otros usos, por ejemplo, se ha demostrado que, en suelos contaminados por plomo, las plantas tienen una disminución significativa del crecimiento, sin embargo, con las NPsZnO se inhibe el estrés inducido por el plomo, además, se aumentó el crecimiento de las plantas y mejoraron los contenidos de clorofila, así como el de los carotenoides. Estos resultados sugieren que las NPsZnO en óptimas cantidades, puede solucionar el efecto de la alta cantidad de metales en los diferentes medios, aumentando el contenido de clorofila (Hussain *et al.*, 2021).

En la interacción fecha x tipo de nanopartícula x concentración (Figura 2), se observó que en la fecha julio23 la concentración 0 ppm aplicando NPsMgO presentó el mayor contenido de clorofila con 36.28 SPAD, mientras que la concentración 200 ppm aplicando NPsZnO presentó un valor de 35.26 SPAD. Por otro lado, en la fecha julio30 el mayor contenido de clorofila se obtuvo al aplicar NPsMgO a una concentración de 500 ppm (36.14 SPAD) el cual fue superior a 34.06 SPAD que se presentó en la concentración 1000 ppm de NPsZnO. Con base en estos resultados se determinó que el contenido de clorofila se ve afectado con respecto al tiempo de maduración de las plantas, obteniendo mejores resultados al usar NPsMgO en comparación con las NPsZnO.

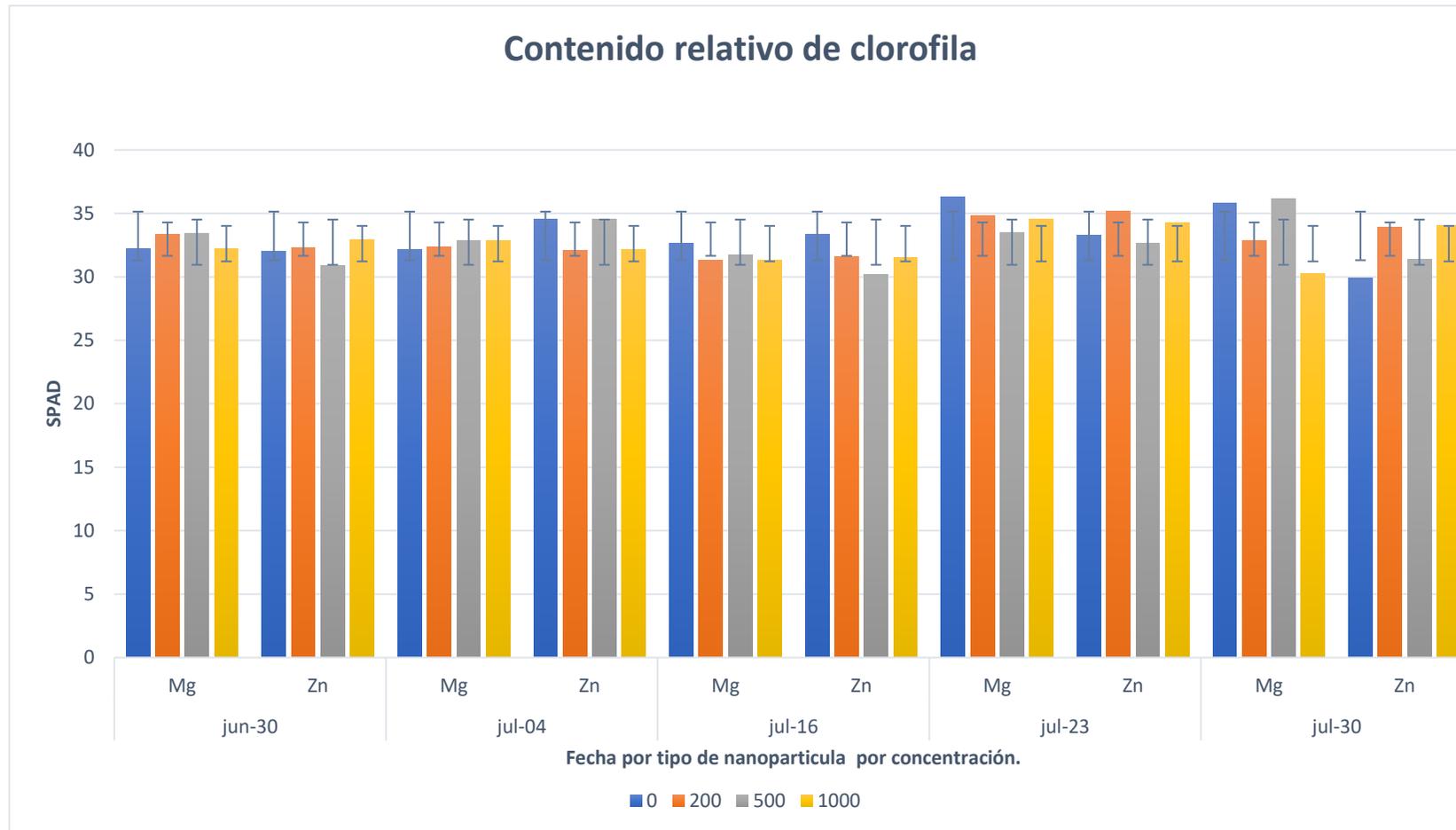


Figura 2. Interacción entre FECHA*NP*CONC en la variable contenido de clorofila evaluada en la parte media de las hojas.

En la comparación de medias del contenido de clorofila por tipo de NP (Cuadro 10), en las variables CLOBA y CLOME, no se encontraron diferencias estadísticas entre los tipos de NPs, siendo estos valores muy similares entre sí; sin embargo, las NPsZnO mostraron valores de 26.47 y 32.60 SPAD, los cuales son numéricamente superiores a los presentados por las NPsMgO. Con un valor de 36.24 en la variable CLOAPI, las NPsZnO presentaron un valor de 36.24 SPAD, siendo este estadísticamente superior, en comparación con las NPsMgO que mostraron un valor de 35.64 SPAD.

Rathore y Tarafdar (2015) reportaron que las NPsMgO podrían interferir en la absorción de luz solar en las hojas de las plantas, lo cual repercute benéficamente en el contenido de clorofila.

Raliya *et al.* (2014) señalaron que al usar NPsMgO sintetizadas de un hongo en plantas de frijol racimo (*Cyamopsis tetragonoloba*), mejoran el contenido de clorofila en las hojas, lo que puede ayudar a mejorar la absorción de luz por parte de las plantas para el proceso de fotosíntesis.

Cuadro 10. Comparación de medias del contenido de clorofila por tipo de NP en plantas de maíz (*Zea mays*) aplicando NPsZnO y NPsMgO.

Tipo de NP	CLOBA (SPAD)	CLOME (SPAD)	CLOAPI (SPAD)
MgO	26.07 a	32.59 a	35.64 b
ZnO	26.47 a	32.60 a	36.24 a
Media	26.27	32.59	35.94
Tukey	0.682	0.601	0.502

Valores con la misma literal en cada columna son estadísticamente iguales; CLOBA= Contenido de clorofila en la base de la hoja; CLOME= Contenido de clorofila en la parte media de la hoja; CLOAPI= Contenido de clorofila en el ápice de la hoja; Mogo= Nanopartículas de óxido magnesio; ZnO= Nanopartículas de óxido zinc.

En el Cuadro 11 se muestra la comparación de medias del contenido de clorofila por concentración, donde, la variable CLOBA presentó que la concentración con 500 ppm es estadísticamente inferior a los demás, con un contenido de 25.00

unidades SPAD. En la variable CLOME se observó que el testigo (0 ppm) fue numéricamente igual a las concentraciones con 200 ppm y 1000 ppm, con valores de 32.95, 32.83 y 32.82 unidades SPAD respectivamente, pero diferente a la concentración con 500 ppm (31.78 unidades SPAD). En la variable CLOAPI, la concentración 0 ppm resultó ser superior y estadísticamente diferente a las demás concentraciones con 37.08 unidades SPAD.

Zarate-Cruz *et al.* (2016) señalaron que las NPsZnO a una concentración de 400 mg, tienen un efecto negativo en las plantas de helechos, esto se debe a que redujeron la concentración y el contenido de clorofila.

Con la ayuda de la síntesis verde de NPsMgO utilizando *Sesbania bispinosa* en plantas de frijol largo (*Vigna unguiculata*), se determinó que el contenido de clorofila se incrementó en las muestras que contenían el medio tratado con NPsMgO, a una concentración de 5 mg/ml. Dado que la clorofila actúa como un componente importante de la actividad metabólica en las plantas, este estudio mostró que las NPsMgO tienen un mayor efecto sobre el crecimiento de las plantas y se puede utilizar como un regulador eficaz del crecimiento (Tamil *et al.*, 2020).

Cuadro 11. Comparación de medias del contenido de clorofila por concentración en plantas de maíz (*Zea mays*) aplicando NPsZnO y NPsMgO.

CONC (ppm)	CLOBA (SPAD)	CLOME (SPAD)	CLOAPI (SPAD)
0	26.60 a	32.95 a	37.08 a
200	27.06 a	32.83 a b	36.03 b
500	25.00 b	31.78 b	35.40 b
1000	26.43 a	32.82 a b	35.26 b
Media	26.27	32.59	35.94
Tukey	1.266	1.115	0.931

Valores con la misma literal en cada columna son estadísticamente iguales; CLOBA= Contenido de clorofila en la base de la hoja; CLOME= Contenido de clorofila en la parte media de la hoja; CLOAPI= Contenido de clorofila en el ápice de la hoja.

V. CONCLUSIONES

La aplicación de suspensiones de NPsZnO al sustrato, incrementó la longitud de la radícula, lo que repercute en una mejor absorción de nutrientes.

Al aplicar NPsZnO se obtuvo mayor acumulación de materia seca en tallo (PSTALLO), indicando la importancia del zinc en la fotosíntesis, como estabilizador de la molécula de clorofila.

Incrementos en las variables NHOJAS, HLIIG, AP, PFTALLO y PSTALLO, se observaron al aplicar NPs a 200 ppm, siendo estadísticamente igual al resto de las concentraciones (500 y 1000 ppm).

El contenido relativo de la clorofila (verdor de las hojas) se incrementó en la base de las hojas a través de las fechas de evaluación y se redujo en el ápice.

Aplicar NPsZnO al sustrato incrementó el contenido relativo de clorofila en el ápice de las hojas, región donde se presentaron los valores más altos, como resultado de la acumulación de estos pigmentos.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez-Lemus, M., López-Goerne, T. 2012. Nanotecnología y cáncer: aplicación al tratamiento de tumores cerebrales. *Archivos de Neurociencias*. 17(2), 102–109.
- Azcon-Bieto, J., Talon, M. 1996. *Fisiología y bioquímica vegetal*. 1º Ed. Ed. Interamericana Mc. Graw-Hill. Madrid, España. 581 p.
- Bartoni, R. 1990. *El maíz*. Agrogúías mundi prensa. Edición mundi prensa. Madrid, España. pp. 95-162
- Bennett, W. 1993. *Nutrient deficiencies and toxicities in crop plants*. APS Press the American Phyto Pathological Society St. Paul. Minnesota, Estados Unidos. 3 p.
- Black, R.E., Allen, L.H., Bhuttatasa, Z.A., Caulfield, L.A., De Onis, M., Essati, M., Mathers, C., Rivera, J. 2008. Maternal and child undernutrition: global and regional exposures and health consequences. *Lancet*. 371:243-260
- Cai, L., Liu, M., Liu, Z., Yang, H., Sun, X., Chen, J., Ding, W. 2018. NPsMgO can boost plant growth: evidence from increased seedling growth, morpho-physiological activities, and Mg uptake in tobacco (*Nicotiana tabacum L.*). *Molecules*. 23(12), 3375.
- Cuervo-Osorio, G.A., Escobar-Jaramillo, M., Ossa-Orozco, C.P. 2020. Diseño factorial 2k para la optimización de la síntesis de nanopartículas de plata para su aplicación en biomateriales. *Revista ION*, 33(1), 17–32.
- Das, P., Barua, S., Sarkar, S., Karak, N., Bhattacharyya, P., Raza, N., Kim, K., Bhattacharya, S. 2018. Plant extract-mediated green silver nanoparticles: Efficacy as soil conditioner and plant growth promoter. *Journal of Hazardous Materials*. 346, 62-72.
- Efroymsen, R.A., Will, M.E., Suter G.W., Wooten, A.C. 1997. *Toxicological benchmarks for screening contaminants of potential concern for effects on terrestrial plants*. Department of energy, office of environmental management activities at the east Tennessee technology park. 123 p.

Espósito, G., Balboa, G., Castillo, C., Balboa, R. 2010. Disponibilidad de zinc y respuesta a la fertilización del maíz en el sur de Córdoba. Memorias XXII. Congreso Argentino de la ciencia de suelo. Asociación Argentina ciencia del suelo, Rosario, Argentina.

Estrada, U.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.*).

García, J.I. 2019. Respuestas fisiológicas y bioquímicas inducidas por nanopartículas de ZnO en semillas y plantas de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq) (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).

Goujard, O., Bayón, C. 2014. Importancia del potasio y el magnesio en la minimización del estrés provocado por sequía. Vida rural. 1, 82-84.

Hanafy-Ahmed, A.H., Khalil, M.K., El-Rahman, A.M., Hamed, N.A.M. 2012. Effect of zinc, tryptophan and indole acetic acid on growth, yield and chemical composition of Valencia orange trees. J. Appl. Sci. Res. 8(2), 901-914.

Jayarambabu, N., Siva, K., Venkateswara, RK., Prabhu Y.T. 2016. Enhancement of growth in maize by biogenic- synthesized MgO nanoparticles. Int j pure appl zool. 4: 262-270.

Jones, B. J. 1998. Plant nutrition. Manual. CRC. Press. pp. 55-76

Kirkby, E., Römheld, V. 2007. Micronutrientes en la fisiología de las plantas: funciones, absorción y movilidad. The International Fertilizer Society, New York, N.Y.

Kramer, U., Talke, I.N., Hanikenne, M. 2007. Transition metal transport. FEBS letters 581:2263-2272.

Lira, R.H., Méndez, B., De los Santos, G., Vera, I. 2018. Potencial de la nanotecnología en la agricultura. Acta Universitaria. 28(2), 9–24.

Lira, R.H., Méndez, B., Vera, I., De los Santos, G. 2018. Agronotecnología: una nueva herramienta para la agricultura moderna. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. 50(2), 395–411.

López, J.A.O., Hernández, M.F., Ortiz, H.O., Preciado, P., Rangel, H.Z.G. 2019. Aplicación foliar de nanopartículas de cobre (NPsCu) y su efecto en el rendimiento de melón hidropónico. *In* IV Congreso Internacional y XV Congreso Nacional sobre Recursos Bióticos de Zonas Áridas. 212 p.

López-Mora, Y., Gutiérrez-Arenas, D.A., Cuca-García, J.M. 2018. Síntesis de nanopartículas y su aplicación en la nutrición animal. *Agroproductividad*. 11(6), 85–90.

Marschner, H. 2002. Mineral nutrition of higher plants. Academic press, London.

Mastronardi, E., Tsae, P., Zhang, X., Monreal, C., De Rosa, M.C. 2015. Strategic role of nanotechnology in fertilizers: Potential and limitations. In: Rai, M., C. Ribeiro, L. Mattoso, N. Duran. (eds). *Nanotechnologies in Food and Agriculture*. Switzerland: Springer, Cham. pp. 25-67

Méndez, B., Lira, R.H., Ruíz, N.A., Cárdenas, A., Ponce, R., Vera, I., Mendoza, E., García, L.A., De los Santos, G. 2015. Influencia de nanopartículas de óxido de zinc puras y dopadas con plata en el crecimiento y producción de biomasa en plántulas de chile. XVI Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería. Guadalajara, Jalisco, México.

Méndez, B., Vera, I., Mendoza, E., García, L.A., Puente, B.A., Lira, R.H. 2016. Promoción del crecimiento en plantas de *Capsicum annuum* por nanopartículas de óxido de zinc. *Nova scientia*. 8(17), 140-156.

Morales, J. 2005. Carencia de nutrientes minerales. Infojardín. España.

Morante. 2014. Recomendaciones para almacenamiento problemas y manejo. Universidad de Cuenca.

Pastelín-Solano, M. C., Ramírez-Mosqueda, M.A., Bogdanchikova, N., Castro-González, C.G., Bello-Bello, J.J. 2020. Silver nanoparticles affect the micropropagation of vanilla (*Vanilla planifolia* Jacks. ex Andrews). *Agro-Ciencia*. 54(1), 1–13.

Prasad, K.V., Sudhakar, P., Sreenivasulu Y., Latha, P., Munaswamy, V., Raja R.K., Sreeprasad, T.S., Sajanlal, P.R., Pradeep, T. 2012. Effect of nanoscale zinc

oxide particles on the germination, growth and yield of peanut. *Journal of Plant Nutrition*. 35(6): 905-927.

Ramos, C.M., Pérez, S., Guerrero, S., Palacios, A. 2021. Biofertilización y nanotecnología en la alfalfa (*Medicago sativa L.*) como alternativas para un cultivo sustentable. *Cultivos Tropicales*. 42(2), 1–15.

Rehman, H.U., Aziz, T., Farooq, M., Wakeel, A., Rengel, Z. 2012. Zinc nutrition in rice production systems: a review. *Plant and Soil*. 361 (1): 203-226.

Rocha, P.J. 2015. Nanopartículas: fundamentos y aplicaciones-capítulo IX: Nano-biotecnología y sus potenciales aplicaciones en agricultura.

Ross, M. 2004. Importancia del magnesio para altos rendimientos sostenibles en palma de aceite. *Revest Palmas*. 25(especial,), 98-104.

Rout, G.R., Das, P. 2003. Effect of metal toxicity on plant growth and metabolism: I. Zinc. *Agronomy*. 23, 3-11

Ruíz Torres, N.A., J. L. García López, R. H. Lira Saldívar, I. Vera Reyes, y B. Méndez Argüello. 2016. Efecto de Nanopartículas Metálicas y Derivadas del Carbón en la Fisiología de Semillas. In R. H. Lira Saldívar, & B. Méndez Argüello, *Agronano Tecnología Nueva frontera de la Revolución Verde*. Saltillo, Coah. Pp. 75-114.

Sabourin, V., and A. Ayande. 2015. Commercial Opportunities and Market Demand for Nanotechnologies in Agribusiness Sector. *Journal of Technology Management and Innovation*. 10(1):40-51.

Sagardoy, R., Morales, A.F., López, M., Abadía, A. Abadía, J. 2008. Effects of zinc toxicity on sugar beet (*Beta vulgaris L.*) plants grown in hydroponics. *Plant Biology*. 11:339-350.

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.

Shyla, K.K., Natarajan, N. 2014. Customizing zinc oxide, silver and titanium dioxide nanoparticles for enhancing groundnut seed quality. *Indian journal of science and technology*. 7(9): 1376-1381.

Talavera, M.E., Zea, I., Vera, G.C., Zea, A.J., Benavente, L.R. 2018. Aplicación del nanocomposito arcilla - carboximetilquitosano - nanopartículas de plata en filtros para el tratamiento de aguas de consumo de zonas rurales de Camaná, Arequipa. *Revista de la Sociedad Química del Perú*. 84(4), 499–512.

Velásquez, C.L., Khatib, S.K., González, F.L. 2015. *Nanopartículas: fundamentos y aplicaciones*. Universidad de los Andes. Colombia.

White, P.J., Broadley M.R. 2005. Biofortifying crops with essential mineral elements. *Trends plants science*. 10: 86-593.