

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Respuesta Agro-Fisiológica de las Plántulas de Maíz (*Zea mays L.*) a la
Aplicación de Nanopartículas de Óxido de Magnesio Bajo Invernadero

Por:

JESÚS NOÉ DÍAZ OLIVAR

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México

Junio 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Respuesta Agro-Fisiológica de las Plántulas de Maíz (*Zea mays* L.) a la
Aplicación de Nanopartículas de Óxido de Magnesio Bajo Invernadero

Por:

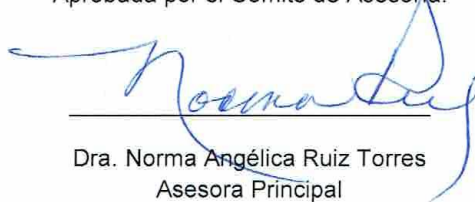
JESÚS NOÉ DÍAZ OLIVAR

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
Asesora Principal


Dra. Pilar Espitia Hernández
Coasesor


Dra. Ileana Vera Reyes
Coasesor


Dr. Alberto Sandoval Rangel
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México.
Junio 2025

CARTA DE NO PLAGIO

Por medio del presente documento yo Jesús Noé Díaz Olivar, hago constar que la tesis titulada " Respuesta Agro-Fisiológica de las Plántulas de Maíz (*Zea mays* L.) a la Aplicación de Nanopartículas de Óxido de Magnesio Bajo Invernadero", a sido desarrollada de mi trabajo personal, en el cual no he utilizado datos, artículos, cuadros o graficas de otros trabajos.

Así mismo dejo constancia que las citas de otros autores han sido identificadas en el trabajo, por lo cual no han sido asumidas como propias.

Atentamente

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jesús Noé Díaz Olivar', is written over a horizontal line.

Jesús Noé Díaz Olivar

DEDICATORIA

Con profundo agradecimiento y amor, dedico esta tesis a mis padres, **Noé Díaz Rosales** y **Rocío Olivar Carreño**. En este momento de logro no puedo evitar pensar en todos los sacrificios que han hecho por mí, en todas las noches que se quedaron despiertos preocupados por mi bienestar, en todas las veces que me apoyaron y me alentaron a seguir adelante.

Su amor incondicional y su fe en mí han sido mi mayor motivación, mi faro en la oscuridad y mi refugio en los momentos difíciles. me han enseñado a ser fuerte, a perseverar, a nunca rendirme, incluso cuando el camino pareciera imposible. Esta tesis no es solo un logro académico, es un tributo a su amor, su dedicación y su sacrificio. Es un recordatorio que no estoy solo en este viaje, de que tengo a dos personas increíbles que me apoyan y me aman sin condición.

A mis hermanas **Keida Joana Díaz Olivar** y **Kendra Dayana Díaz Olivar**, por su apoyo y motivación constante. Su presencia en mi vida ha sido invaluable y me ha permitido crecer y desarrollarme como persona. Gracias por su amor, apoyo y comprensión en cada momento, por escucharme, aconsejarme y motivarme a seguir adelante. Este logro no solo es mío, es también de ustedes, y aunque el camino ha sido largo y difícil, sé que juntos llegaremos más lejos. Juntos hemos compartido momentos inolvidables y superados obstáculos que nos han hecho más fuertes. Su influencia positiva ha sido fundamental en mi vida y estoy agradecido por la relación tan especial que compartimos. Las amo y las admiro, y aunque el tiempo pasa, espero que sigamos unidos por siempre.

A mis queridos Ama **Tomasa Carreño Montiel** y Apa **Juan Olivar Domínguez**, les dedico este trabajo con todo mi afecto y aprecio.

Ama Tomasa, en el momento en que mis sueños se convirtieron en realidad, mi corazón se llenó de gratitud hacia ti. Recuerdo el día que me fui a Saltillo, y aunque tu llanto me dolió, hoy entiendo que fue un reflejo de tu amor profundo. Gracias por ser mi brújula en momentos de incertidumbre, por tus palabras de sabiduría que me guiaron y por el amor incondicional que siempre me brindaste. Este logro es un eco de tus enseñanzas y un testimonio de la fortaleza que me

has transmitido. En cada paso que doy, siento tu presencia y tu apoyo. Te amo y te agradezco por ser mi fuente de inspiración.

Apa Juan, gracias por ser mi mentor y mi guía en el campo. Desde pequeño, tuve la oportunidad de trabajar con usted y aprender de sus habilidades y conocimientos. Me enseñó a sembrar, a cosechar y a cuidar de la tierra. Pero más que eso, me enseñó a ser trabajador, a ser honesto y a ser perseverante. Recuerdo tus consejos. Esos consejos se han quedado grabados en mi mente y me han ayudado a superar obstáculos en mi vida.

A mi querida sobrina **Eva Angelique Díaz Díaz**, o mejor dicho **Evita**, espero ser un buen tío para ti, aunque la distancia nos separe. Quiero que sepas que eres una fuente de motivación para mí, y espero que puedas ver en mí un ejemplo de que, con esfuerzo y dedicación, se pueden lograr grandes cosas. Te quiero Evita. Con todo mi amor y apoyo tu tío.

A mis queridas tías **Adriana Olivar Carreño** y **Mariela Olivar Carreño**, quiero dedicarles un pensamiento especial. Siempre que llegaba de vacaciones a casa y tenía que volver a regresar a la universidad, ustedes siempre me daban consejos y se despedían de mí con todo el cariño. Recuerdo sus palabras de aliento y su apoyo incondicional. Me hacían sentir que siempre estaba en sus pensamientos y que me querían mucho. Esos momentos son inolvidables para mí, y siempre los llevaré en mi corazón. Gracias, tías, por ser tan especiales y por estar siempre ahí para mí. Las quiero mucho, y espero que puedan sentirse orgullosas de mí.

AGRADECIMIENTOS

¡Gracias **Dios** por este increíble logro! Me siento profundamente agradecido por haberme permitido llegar a este momento tan especial en mi vida. La culminación de mi carrera universitaria es un sueño hecho realidad, y sé que sin su guía y bendición no habría sido posible ¡Gloria a Dios por este triunfo!

Quiero expresar agradecimiento a la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro** (UAAAN) ha sido mi segundo hogar, donde adquirí conocimientos y habilidades en cada salón de clase, desde las teorías agronómicas hasta las prácticas de campo. Las prácticas profesionales me permitieron aplicar lo aprendido y crecer como profesional. Las oportunidades de investigación, los proyectos de innovación y las experiencias de intercambio académico me enriquecieron y me prepararon para enfrentar los desafíos del mundo laboral. Estoy profundamente agradecido por la formación que recibí en esta institución y por las oportunidades que me brindó para crecer personal y profesionalmente. ¡Una vez buitre, buitre siempre!

A mi asesora la Dra. **Norma Ruiz Torres**, mi más sincero agradecimiento por su invaluable apoyo y orientación durante mi formación. Su pasión por la investigación y su dedicación a sus estudiantes son un ejemplo para seguir. Recuerdo sus palabras: “No vas a ver el fruto de inmediato. El conocimiento y el estudiante son como un pino, tardan años en crecer”. Ahora, al obtener mi título, veo reflejado ese crecimiento lento pero firme en cada logro, en cada desafío superado. Su influencia en mi vida va más allá de lo académico; sus consejos de vida me han formado como persona. Gracias por creer en mí y por ayudarme a crecer. Su legado como investigadora y mentora es invaluable, y me siento afortunado de haber sido su estudiante y su tesista.

A mis **maestros** de la UAAAN, les expreso mi más profundo agradecimiento por sembrar en mí la semilla del conocimiento y la pasión por mi carrera. Su ejemplo, dedicación y entrega han sido un faro que ha guiado mi camino. Gracias por desafiarme a ser mejor, por creer en mí y por compartir su sabiduría con generosidad. Su legado en mí perdurará por siempre.

RESUMEN

Este ensayo se realizó en el invernadero No. 2 del Departamento de Fitomejoramiento de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicado en Buenavista, Saltillo, Coahuila, durante el ciclo primavera-verano del año 2023. Se evaluó el efecto de diferentes concentraciones de nanopartículas de óxido de magnesio (NPsMgO) (0, 25, 50, 75 y 100 ppm), en el crecimiento y desarrollo de plántulas de maíz híbrido RX-715 (*Zea mays L.*).

El experimento se estableció bajo un diseño experimental completamente al azar, utilizando macetas de polietileno negro con una capacidad de 5 L, llenadas con una mezcla de vermiculita y perlita en una proporción de 60:40 (v/v). Se aplicó una solución nutritiva preparada de acuerdo con la solución de Hoagland, eliminando el aporte de magnesio y sustituyéndolo con las nanopartículas de óxido de magnesio NPsMgO.

La importancia de desarrollar este experimento radica en la búsqueda de alternativas sostenibles y eficientes para mejorar la productividad de los cultivos de maíz, uno de los principales alimentos básicos en muchas partes del mundo.

Las variables evaluadas fueron: número de hojas (Nhojas), contenido de clorofila en la base de la hoja (Cbase), contenido de clorofila en la parte media de la hoja (Cmedia), contenido de clorofila en el ápice de la hoja (Cápice), altura de tallo (ALtallo), ancho del tallo (Anctallo), delgado del tallo (Deltallo), largo de raíz (LRaíz), peso seco de raíz (PSraíz), y peso seco foliar (PSfoliar).

Se encontraron diferencias significativas en variables como número de hojas, altura del tallo, ancho del tallo, peso seco de raíz y peso seco foliar. La concentración de 25 ppm de NPsMgO presentó los valores más altos en las variables número de hojas y altura del tallo, y también mostró un aumento significativo en el ancho del tallo, peso seco de raíz, y peso seco foliar.

Se destacó que no siempre son necesarias altas dosis de NPsMgO para obtener resultados favorables en las plantas de maíz.

Las correlaciones más importantes del estudio mostraron que el número de hojas se relaciona positivamente con la altura y el ancho del tallo. A su vez, la altura

del tallo también se correlacionó con el ancho del tallo y con el peso seco de raíz y foliar. Una de las correlaciones más destacadas fue entre el peso seco de raíz y el peso seco foliar, lo que sugiere una fuerte relación entre el crecimiento de la raíz y las hojas. Además, se encontró una correlación positiva entre el contenido de la clorofila del ápice y el ancho del tallo. Por otro lado, se observó una correlación negativa entre el diámetro del tallo y el contenido de clorofila en la base de la hoja, lo que sugiere que a medida que aumenta el diámetro del tallo, disminuye el contenido de clorofila en la base de la hoja. En general, estas correlaciones indican que el crecimiento y desarrollo de la planta están estrechamente relacionados con la disponibilidad de nutrientes y la eficiencia en la fotosíntesis.

La aplicación de NPsMgO puede ser una herramienta valiosa para los agricultores, ya que consigue mejorar el crecimiento y desarrollo de las plantas, aumentando la eficiencia en el uso de nutrientes y reduciendo la necesidad de fertilizantes químicos. Esto puede tener un impacto positivo en la seguridad alimentaria y en la sostenibilidad de la agricultura.

ÍNDICE DE CONTENIDO GENERAL

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	vi
ÍNDICE DE CUADROS	i
ÍNDICE DE FIGURAS	i
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo general	3
2.2 Objetivos específicos	3
2.3 Hipótesis	3
III. REVISIÓN DE LITERATURA	4
3.2 Deficiencias del Magnesio en las plantas	5
3.3 Nanotecnología	6
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	11
4.1 Localización del Experimento	11
4.2 Material Genético	11
4.3 Sustrato	12
4.4 Diseño Experimental	13
4.5 Aclareo	13
4.6 Riego	13
4.7 Solución nutritiva	13
4.8 Incidencias de plagas y enfermedades	15
V. VARIABLES EVALUADAS	16

5.1	Altura de planta	16
5.2	Número de hojas por planta.....	16
5.3	Contenido de clorofila (base, media y ápice de la hoja).....	17
5.4	Ancho y delgado del tallo.....	17
5.5	Largo de la raíz.....	18
5.6	Peso seco del tallo y de la raíz	18
VI.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
VII.	CONCLUSIONES.....	28
VIII.	RECOMENDACIONES	29
IX.	LITERATURA CITADA	30

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Soluciones madre para preparar Hoagland.	14
Cuadro 2. Cuadrados medios del ANVA para variables agronómicas evaluadas en plantas de maíz (<i>Zea mays</i> L.) tratadas con NPsMgO, bajo condiciones de invernadero.	20
Cuadro 3. Cuadrados medios del ANVA para variables agronómicas evaluadas en plántulas de maíz (<i>Zea mays</i> L.) tratadas con de NPsMgO, bajo condiciones de invernadero.	21
Cuadro 4. Comparación de medias para variables agronómicas evaluadas en plantas de maíz (<i>Zea mays</i> L.) tratadas con NPsMgO bajo condiciones de invernadero.	21
Cuadro 5. Comparación de medias para variables agronómicas evaluadas en plántulas de maíz (<i>Zea mays</i> L.) con tratamientos de NPsMgO bajo condiciones de invernadero.	24
Cuadro 6. Coeficientes de correlación de Pearson para las variables agronómicas evaluadas en maíz (<i>Zea mays</i> L.) con tratamientos de NPsMgO, bajo condiciones de invernadero.....	27

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del experimento en la UAAAN.	11
Figura 2. Híbrido de maíz RX-715 ASGROW.....	12
Figura 3. Preparación del sustrato y acomodo de macetas dentro del invernadero.	12
Figura 4. Preparación de la solución nutritiva en el Laboratorio de Fisiología de Semillas del Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas.	14
Figura 5. Toma de datos para la variable altura de planta.	16
Figura 6. Conteo y observación de número de hojas por planta.	16
Figura 7. Toma de datos de la base, parte media y ápice de la hoja.	17
Figura 8. Medición de ancho de tallo con Vernier.....	17
Figura 9. Corte en la base la planta y medición de raíz en peso fresco.	18
Figura 10. Determinación del peso seco del tallo y de la raíz de cada planta.	19

I. INTRODUCCIÓN

En México encontramos una gran cantidad de maíces propios de cada región, que interactúan con las condiciones del ambiente para expresar su fenotipo. Asimismo, a través del mejoramiento genético se han modificado sus características fenotípicas y fisiológicas, consiguiendo cambios significativos que se reflejan en un mayor rendimiento, tolerancia a plagas y enfermedades, así como una mejor calidad nutricional del grano.

Se ha buscado también mejorar las características físicas de la raíz, puesto que es un órgano crítico para la absorción de nutrientes y agua, y su función es esencial para el crecimiento de la planta. Sin embargo, este órgano es susceptible a varios factores de estrés, como la sequía, la salinidad y las enfermedades, lo que puede afectar negativamente el rendimiento del cultivo.

Con la ayuda de la nanotecnología (NT) la agricultura ha tenido un refuerzo efectivo, para mejorar la eficiencia de ciertos fertilizantes, disminuir el uso de agroquímicos que dañan el ambiente, pudiendo llegar a causar toxicidad al aplicarlos. Con el uso de la NT, favorablemente estaremos protegiendo los diferentes agroecosistemas.

En años recientes se han realizado diferentes investigaciones con progresos notables en la implementación de NT, como una plataforma para investigar sus efectos en la absorción y desarrollo de los diferentes cultivos, desde la germinación de semillas hasta el crecimiento progresivo de las plántulas.

El tamaño nano de estos productos brinda una mayor absorción y penetración a través de las membranas o paredes biológicas, causando cambios fisiológicos y metabólicos, en comparación con otros materiales de mayor escala.

Entre las nanopartículas que actualmente se están estudiando, está el óxido de magnesio (MgO). El magnesio forma parte importante de la molécula de la clorofila, participa en la activación de diferentes enzimas que están relacionadas con el proceso de germinación, también está vinculado con el transporte de nutrientes y de iones a través de la membrana celular, además de ayudar en la regulación del pH celular, lo que es importante para mantener la homeostasis y el crecimiento de las plantas. Algo

importante de mencionar, es que este macroelemento ayuda a las plantas a resistir el estrés causado por las temperaturas extremas.

Tomando en cuenta lo anterior, de la agricultura tradicional a la agricultura en conjunto con la NT como una alternativa sostenible para poder investigar su impacto en los diferentes órganos de la planta, o en la productividad de diferentes cultivos, a través de trabajos de investigación, se puede mejorar la calidad de las semillas, su expresión de vigor al germinar y desarrollarse la plántula, repercutiendo en un buen rendimiento.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar la respuesta agro-fisiológica de las plantas de maíz cultivadas en invernadero a la aplicación de nanopartículas de óxido de magnesio (NPsMgO).

2.2 Objetivos específicos

- I. Determinar la respuesta a la aplicación de NPsMgO en variables relacionadas con el crecimiento de las plantas de maíz.
- II. Determinar el efecto de las NPsMgO en el verdor de las hojas (contenido de clorofila).

2.3 Hipótesis

Hi: La aplicación de NPsMgO en diferentes concentraciones afecta la respuesta de las variables agronómicas, la acumulación de la biomasa, y el contenido de clorofila en plantas de maíz.

Ho: La aplicación de NPsMgO en diferentes concentraciones no afecta la respuesta de las variables agronómicas, la acumulación de la biomasa, y el contenido de clorofila en plantas de maíz.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

México es el Centro de Origen y Biodiversidad del maíz (*Zea mays* L.), es el cultivo de mayor importancia histórica y cultural del país. El consumo per cápita de maíz en el territorio mexicano es de alrededor de 133.6 kg/persona (FIRA., 2024). El grano se utiliza para elaborar tortillas, y los más de 600 distintos platillos de la gastronomía mexicana.

Este es el cultivo que genera más valor económico para México, en el ciclo comercial 2022-2023 su producción fue de más de 27 millones de toneladas. A nivel mundial, México es el 7° productor de este grano, esto sin incluir a la Unión Europea, de lo contrario ocupa el 8° lugar. Los principales estados productores son Sinaloa y Jalisco (FIRA, 2024).

Para incrementar el rendimiento, el manejo nutricional adecuado del cultivo de maíz es fundamental, la utilización de nuevas tecnologías es una herramienta importante para impactar de manera favorable en los resultados. El magnesio (Mg), junto con el calcio y el azufre son tres nutrientes necesarios para la nutrición balanceada de los cultivos. Sin embargo, frecuentemente no se incluyen en los programas de fertilización, ocurriendo deficiencias, que pueden llevar a un crecimiento y rendimiento reducido del cultivo (Mengutay *et al.*, 2018).

3.1 El Magnesio en las plantas

El Magnesio (Mg) en el suelo se caracteriza por su proceso dinámico, que es activado por factores como el clima, pH del suelo, temperatura y humedad del suelo, además de la presencia de otros cationes. Este elemento se encuentra en las rocas y minerales primarios y representa un aproximado de 90 al 99% de las reservas totales, y se halla presente en cantidades mayores que las absorbidas por las plantas. El Mg intercambiable que ha llegado hasta un 5% del Mg total, se absorbe en la superficie de los minerales de la arcilla y la materia orgánica, y es liberado fácilmente por los cationes como K^+ y Ca^{2+} . La disponibilidad de Mg para la planta depende de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo.

Las plantas usan el Mg en pequeñas cantidades, sin embargo, las pérdidas naturales del suelo y la recurrente extracción de las cosechas son vectores que inciden en las deficiencias de este elemento (Sánchez, 1981).

Este elemento es asimilado por las plantas de manera ion Mg^{+2} , es parte primordial en la molécula de la clorofila (pigmento verde que funciona como receptor de energía lumínica). Además, promueve la síntesis de los diversos aceites vegetales. Es cofactor en enzimas del grupo de las sintetizadoras de polipéptidos, las transfosforilasas y descarboxilasas (Moreno, 2007). También está involucrado en el balance catión – anión, es encargado de la regulación del pH y de la modificación de turgencia en las células de las plantas. Por otro lado, al aplicar magnesio en diferentes cultivos beneficia el acceso de las raíces a nutrientes de baja movilidad, y con ellos ayuda a incrementar la absorción de agua de manera eficiente. Mejora la eficiencia nutritiva de los cultivos que se desarrollan en condiciones de suelos ácidos (Ross, 2004). Este elemento se ha encontrado como parte de un compuesto de reserva en las semillas, la fitina (fosfato cálcico y magnesio de inositol), indispensable para la germinación (Terrón, 2011).

El Mg es un nutriente esencial para una amplia gama de procesos fisiológicos y bioquímicos fundamentales en las plantas, donde las membranas permiten su transporte hacia el citoplasma (Li *et al.*, 2023).

(Wang *et al.*, 2020) indicaron que la fertilización con Mg mejora el rendimiento de los cultivos, al optimizar el rendimiento, y debido a que se obtienen resultados fisiológicos favorables, brinda un gran potencial para lograr mayor calidad de los cultivos

3.2 Deficiencias del Magnesio en las plantas.

La carencia de magnesio ha sido identificada en numerosos cultivos, aunque es importante destacar que rara vez alcanza niveles críticos. Generalmente se trata de deficiencias leves, provocadas involuntariamente por prácticas agrícolas, más que por la escasez del elemento. Un exceso de fertilizantes potásicos, la falta de suministro adecuado de nitrógeno y la acumulación de fósforo debido al uso generalizado de superfosfatos o fosfatos, son factores que contribuyen a la deficiencia de magnesio, debido a las interacciones nitrógeno-potasio.

En las plantas muchos procesos fisiológicos y bioquímicos críticos son afectados negativamente por la deficiencia de Mg, llevando a deficiencias en el crecimiento y rendimiento. En la mayoría de los casos, la participación de Mg en procesos metabólicos depende de este macroelemento activando numerosas enzimas. (Cakmak *et al.*, 2010). Sin embargo, el amarillamiento intervenal de las hojas viejas es el síntoma más común y conocido de la deficiencia de Mg.

De acuerdo con (Vistoso y Martínez 2020), los principales síntomas asociados a la deficiencia de Mg en plantas son: retraso en el crecimiento y tallos delgados y largos. El Mg es móvil en la planta, se transloca desde las hojas más viejas a las más jóvenes, por ello, las hojas jóvenes no se ven afectadas. Se desarrolla una clorosis (amarillamiento del tejido foliar) intervenal de color amarillo claro en la zona media de las hojas viejas que avanza hacia la punta y la base de las hojas. Bajo condiciones de deficiencia severa de Mg, la clorosis evolucionará a franjas color café, posteriormente, tanto las puntas como los márgenes de las hojas se necrosan causando la muerte prematura del tejido foliar.

(Hermans *et al.*, 2010) observaron que la deficiencia de Mg resulta en tallos y raíces pequeñas, indicando procesos metabólicos esenciales anormales, afectando el metabolismo del carbono, con una reducción en la clorofila y en la fijación de carbono.

3.3 Nanotecnología

En un tiempo relativamente breve, la nanotecnología (NT) ha tenido un impacto significativo en diversos sectores, incluyendo la agroindustria. Esta tecnología se enfoca en la caracterización, elaboración y aplicación de materiales a nanoescala (1-100 nm), denominados nanopartículas (NPs) (Yadollahi *et al.*, 2010). La nanotecnología es un campo interdisciplinario que abre oportunidades en áreas como la medicina, la industria farmacéutica, la electrónica y la agricultura sostenible (Prasad *et al.*, 2014).

Las nanopartículas (NPs) son agregados atómicos o moleculares (Mihail, 2003), que, debido a su tamaño reducido, exhiben propiedades fisicoquímicas únicas y mejoradas en comparación con el material a granel tamaño micro.

La NT en el sector agrario está tomando relevancia, busca innovar y generar tecnología para producir más alimento con una buena calidad nutricional. La NT

surgió como un gran avance tecnológico para transformar la forma de aplicar productos químicos, como lo son los nanofertilizantes, nanofungicidas, y nanoherbicidas entre otros agroproductos, que ayudan al buen desarrollo fisiológico de los cultivos agrícolas (Lira *et al.*, 2018).

Los productos a base de nanopartículas han demostrado ser eficaces en la provisión continua de nutrientes, mediante una liberación gradual y controlada. Esta técnica de liberación retardada promueve una mayor eficiencia en la entrega de nutrientes, lo que acelera la germinación temprana, el crecimiento vigoroso y un alto nivel de nutrición en las plantas (Lateef *et al.*, 2016).

Abbas *et al.* (2024) realizaron un trabajo de investigación sobre el efecto de nanopartículas de magnesio (NPsMgO) sintetizadas a partir de olivo dulce (*Osmanthus fragrans*) en maíz, documentando lo siguiente: en el estudio de germinación, observaron que al tratar las semillas con 500 ppm se incrementó el porcentaje con respecto al testigo, de 27.33 a 83.33 %. En campo, se estableció otro estudio, aplicando por aspersión a las hojas, obteniendo mayor altura de tallo y longitud de raíz con el mismo tratamiento de 500 ppm, superando al testigo, 100 y 200 ppm. También realizaron un estudio a nivel enzimático, observando mayor actividad de la SOD (superóxido dismutasa) en tejido foliar obtenido de plantas tratadas con 500 ppm de NPsMgO. Para la enzima PPO (polifenol oxidasa) mayor activación se observó en tejido radicular de plantas tratadas con 500 ppm de NPsMgO. En las enzimas CAT (catalasa) y POD (peroxidasa) se observó en ambas un incremento gradual en la actividad, al aumentar de 0 a 500 ppm, tanto en tejido foliar como radicular. La enzima fenilalanina amoniaco liasa (PAL) que protege a algunas plantas de infecciones, presentó mayor activación en raíces de plantas de maíz tratadas con 500 ppm de NPsMgO. En tejido foliar el testigo presentó 26.82%, mientras que el tratamiento con 500 ppm fue de 54.32%. En raíces de 41.87% para el testigo, y 73.0% para 500 ppm. El contenido de taninos igualmente incrementó al aumentar la concentración de NPsMgO hasta 500 ppm. En este trabajo de investigación también observaron mayor crecimiento en invernadero en plantas tratadas con NPsMgO.

En semillas de Cacahuate, Jhansi *et al.* (2017) evaluaron la aplicación de NPsMgO biosintetizadas de diferentes tamaños (20, 18.5, 18, 16.5 y 15 nm). Las NP de MgO de tamaño más pequeño (15 nm) mejoraron la germinación y los parámetros de

crecimiento en comparación con los tamaños restantes, incluyendo el control. Las NPsMgO penetraron en las semillas de cacahuete y afectan el mecanismo de germinación y la tasa de crecimiento. Además, se encontró que en el ensayo de germinación el efecto de las NPsMgO fue mayor que en campo. Los métodos fisicoquímicos indicaron que las nanopartículas de MgO pueden penetrar en la cubierta de la semilla y favorecer la absorción de agua dentro de las semillas. Probablemente, este efecto positivo puede causar la absorción de nanopartículas de MgO por las plantas. El tamaño más pequeño (15 nm) de las nanopartículas de MgO, estimuló el desarrollo de las plántulas y mejoró el crecimiento de la planta de cacahuete. Esta investigación es útil para el cultivo de cacahuete en la producción agrícola a gran escala.

Otro estudio en semillas de maíz, llevado a cabo por Shinde *et al.* (2020) sobre la promoción de la germinación y crecimiento de plántulas con tratamientos de nanopartículas de hidróxido de magnesio, demostró que con estas nanopartículas aumentó significativamente la tasa de germinación y el crecimiento de las plántulas. La investigación evaluó la influencia de diferentes concentraciones de nanopartículas de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 y 1000 ppm) en la germinación de las semillas. Los resultados mostraron que la tasa de germinación más alta (100%), se observó cuando las semillas se trataron con 500 ppm de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ NP, mientras que el control mostró solo un 41.6% de germinación. Además, el índice de tasa de germinación (ITG) más alto (3 semillas por día), se registró con el tratamiento con 500 ppm de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ NP. El tiempo medio de germinación (TMG) más bajo (1.2 días), también se observó con el tratamiento con 500 ppm de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ NP. La dependencia de la concentración en la germinación de las semillas es un hallazgo importante, ya que sugiere que la cantidad de nanopartículas utilizadas puede ser crucial para obtener resultados óptimos. En cuanto al crecimiento de las plántulas, se observó que las semillas tratadas con NPs $\text{Mg}(\text{OH})_2$, mostraron al germinar un aumento significativo en la altura de los brotes y la longitud de las raíces en comparación con las semillas sin tratar.

La altura máxima de los brotes (8.2 ± 0.3 cm) y la longitud de las raíces (14.1 ± 0.6 cm) se registraron con el tratamiento con 500 ppm de NPs $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Estos resultados sugieren que las nanopartículas de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ pueden promover el crecimiento de las

plántulas de manera efectiva. Además, la investigación se extrapoló a experimentos in vitro utilizando plántulas de maíz. En el primer experimento, las semillas se germinaron en la mitad del medio de Murashige y Skoog (MS), y posteriormente, las semillas con radícula emergente se inocularon en medio MS completo suplementado con dos concentraciones diferentes de NPsMg(OH)_2 (200 ppm y 500 ppm). Los resultados mostraron que el tratamiento con 500 ppm de NPsMg(OH)_2 aumentó significativamente la altura de los brotes (11.96 ± 0.4 cm) y la longitud de la raíz (3.92 ± 0.4 cm), en comparación con el control (4.08 ± 0.1 cm y 1.2 ± 0.1 cm), respectivamente. En comparación con el tratamiento con 200 ppm de NPs Mg(OH)_2 , el tratamiento con 500 ppm de $\text{Mg(OH)}_2\text{NP}$ también mostró un aumento significativo en la altura de los brotes (9.0 ± 0.2 cm) y la longitud de la raíz (3.52 ± 0.08 cm). Estos resultados sugieren que las nanopartículas de Mg(OH)_2 pueden ser efectivas en diferentes etapas del crecimiento de las plantas y que la concentración de 500 ppm es la más efectiva para promover el crecimiento de las plántulas. En general, el estudio demostró el potencial de las nanopartículas de Mg(OH)_2 para mejorar la producción de cultivos. La capacidad de estas nanopartículas para mejorar la germinación y el crecimiento de las plántulas de manera dependiente de la concentración las convierte en una herramienta prometedora para la agricultura.

Sharma *et al.* (2022) realizaron un trabajo de investigación sobre la influencia del nanocebado de nanopartículas de óxido de magnesio (MgO-NP) en garbanzo negro, su objetivo se centró en la evaluación de los efectos de estas nanopartículas en el crecimiento y desarrollo de la planta, con un enfoque particular en la raíz del cultivo. Los resultados del estudio revelaron que el tratamiento con MgO-NP mostró una longitud de brote y raíz mejorada que el control sin tratar. Fue evidente un aumento de 71 % con N10, 150 % con N50, 132 % con N100 y 142 % con N150. en la longitud de los brotes con la exposición a MgO-NP . De manera similar, la longitud de la raíz se mejoró 217 % con N10, 236 % con N50, 219 % con N100 y 328 % con N150. con las nanopartículas de MgO-NP . Asimismo, el número de raíces laterales con incrementos porcentuales de 60 % con N10, 109 % con N50, 130 % con N100 y 87 % con N150. Sin embargo, el contenido de agua disminuyó en un 15, 7, 16 y 5 %, esto sugiere que estas nanopartículas tienen un efecto positivo en el crecimiento y desarrollo de la raíz. Desde un punto de vista técnico, el aumento en la longitud de

las raíces pudo atribuirse a la capacidad de las MgO-NP para mejorar la absorción de nutrientes y agua por la planta. Las nanopartículas de MgO pueden interactuar con la membrana celular de las raíces, aumentando la permeabilidad y permitiendo una mayor absorción de nutrientes esenciales. Además, las MgO-NP pueden regular la producción de hormonas vegetales que controlan el crecimiento y desarrollo de las raíces, lo que puede influir en la longitud y la biomasa de las raíces. En el mismo estudio también encontró que el tratamiento con MgO-NP aumentó significativamente el contenido de clorofila en las hojas del garbanzo en comparación con el control, lo que sugiere que estas nanopartículas pueden mejorar la capacidad fotosintética de la planta. El aumento en el contenido de clorofila puede estar relacionado con la mejora en la absorción de nutrientes esenciales, como el nitrógeno y el magnesio, que son fundamentales para la síntesis de clorofila. Además, el estudio mostró que el tratamiento con MgO-NP aumentó la biomasa fresca y carbohidratos en las plantas nanocebadadas, con respecto al control. La biomasa fresca aumentó considerablemente en un 39 %, 60 %, 115 % y 112 % en 45 las plántulas con el tratamiento N150, asimismo, se observó un aumento del 3 %, 7 %, 10 % y 15 % en el contenido de carbohidratos con los tratamientos N100 y N150 para esta variable en comparación con el control. El aumento en el contenido de carbohidratos también puede reducir la cantidad de taninos que precipitan las proteínas, lo que puede mejorar la digestibilidad y solubilidad de las proteínas. En general, los resultados del estudio sugieren que las MgO-NP tienen un efecto positivo en el crecimiento y desarrollo del garbanzo negro, particularmente en la raíz del cultivo. La capacidad de estas nanopartículas para mejorar la absorción de nutrientes, regular la producción de hormonas vegetales y aumentar la capacidad fotosintética de la planta las convierte en una herramienta prometedora para mejorar la productividad y sostenibilidad agrícola.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Localización del Experimento

Este ensayo se realizó en el invernadero No. 2 del Departamento de Fitomejoramiento de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, durante el ciclo primavera-verano del año 2023, ubicado en #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. Ubicación del experimento en la UAAAN.

4.2 Material Genético

El híbrido de maíz RX-715 (*Zea mays L.*) se caracteriza por su alto potencial para la producción de elote amarillo de calidad, valor forrajero en hoja y silo, y precocidad. Es ideal para la siembra de cierre y para temporales en la región norte, debido a su adaptabilidad a las condiciones climáticas y edafológicas de la zona. El RX-715 presenta una maduración temprana, grano de alta calidad, y un alto valor forrajero, lo que lo hace una excelente opción para los agricultores que buscan maximizar la producción del cultivo.



Figura 2. Híbrido de maíz RX-715 ASGROW.

4.3 Sustrato

Se emplearon macetas de polietileno negro con una capacidad de 5 litros, las cuales fueron llenadas con una mezcla de vermiculita y perlita en una proporción de 60:40 (v/v), previamente humedecida para asegurar una adecuada retención de agua y aeración del medio de crecimiento.

Las macetas preparadas fueron distribuidas en una cama de cultivo, donde se dispusieron 8 plantas por tratamiento, sin espaciamento entre ellas, con el fin de evaluar el crecimiento y desarrollo de las plantas bajo condiciones controladas y con un manejo óptimo del espacio.



Figura 3. Preparación del sustrato y acomodo de macetas dentro del invernadero.

4.4 Diseño Experimental

Este ensayo se estableció bajo un diseño experimental completamente al azar, se colocaron 2 semillas en el centro de cada maceta (bolsa de polietileno).

Modelo Matemático:

$$y_i = \mu + \tau_i + \varepsilon_i$$

Donde:

y_i = Respuesta de la variable dependiente

i : 1...t

μ : Respuesta promedio

τ_i : Efecto de los tratamientos

ε_i : Error experimental

4.5 Aclareo

Al emerger las primeras hojas verdaderas, se procedió a seleccionar la planta más vigorosa y con mejor porte, la segunda planta se eliminó.

4.6 Riego

Enseguida se aplicó el primer riego por maceta con agua potable, para poder conservar la humedad de la perlita y vermiculita que se utilizaron como sustrato en nuestro cultivo. Se aplicó 400 mL de agua diariamente por seis días.

4.7 Solución nutritiva

La solución nutritiva se preparó de acuerdo con lo indicado en la solución de Hoagland, eliminando el aporte de magnesio y sustituyéndolo con las nanopartículas de óxido de magnesio (NPsMgO). Se evaluaron cinco tratamientos con NPsMgO, el testigo (0 ppm), 25, 50, 75 y 100 ppm (**Cuadros 1 y 2**).



Figura 4. Preparación de la solución nutritiva en el Laboratorio de Fisiología de Semillas del Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas.

Cuadro 1. Soluciones madre para preparar Hoagland.

Compuesto	Concentración ml/L de agua
KNO_3	24
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	16
$(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$	8
$\text{MoO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	8
Quelato de Fe ($\text{FeSO}_4 + \text{Na}_2\text{EDTA}$)	2

Cuadro 2. Micronutrientes utilizados para la solución nutritiva para el riego.

Micronutrientes	Concentración g/L	ml/L de agua
KCl	1.864	1
H_3BO_3	0.773	1
$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	0.169	1
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.288	1
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.062	1
H_2MoO_4	0.040	1
NaFeO_2	30	1

Inicialmente se aplicaron 400 mL de agua potable por planta, transcurridos 6 días después de la siembra se aplicó 200 mL de la solución nutritiva por planta (tres veces por semana) y 200 mL de agua potable (todos los días). Nueve días después de la siembra se aplicó 100 mL de NPs MgO por planta, con una frecuencia de 2 veces por semana. De acuerdo con las necesidades de la planta y factores abióticos (clima y temperatura) se incrementó la dosis de agua potable, en este periodo de tiempo se presentaron altas temperaturas dentro del invernadero, se optó por aplicar 300 mL de agua potable por riego, ya que el sustrato no retenía el agua necesaria para el buen desarrollo del cultivo. La aplicación de las NPs MgO se mantuvo hasta el término del experimento.

4.8 Incidencias de plagas y enfermedades

Durante el periodo de evaluación en el invernadero, no se registraron incidencias significativas de plagas o enfermedades que afectan el crecimiento y desarrollo de las plantas. Cabe destacar que se implementó un programa de monitoreo diario para detectar cualquier signo o síntoma de estrés o daño en las plantas, lo que permitió una intervención oportuna y efectiva en caso de necesidad.

V. VARIABLES EVALUADAS

5.1 Altura de planta

Se determinó mediante la medición lineal de la distancia entre la base de la planta y el ápice de ésta, utilizando una regla métrica. Este procedimiento se llevó a cabo en cada una de las repeticiones del experimento, garantizando así la precisión y la reproducibilidad de los resultados.



Figura 5. Toma de datos para la variable altura de planta.

5.2 Número de hojas por planta

Se evaluó mediante un conteo sistemático y exhaustivo, iniciando desde la primera hoja emergida hasta la última hoja verdadera funcional de cada planta, en cada una de las repeticiones del experimento.



Figura 6. Conteo y observación de número de hojas por planta.

5.3 Contenido de clorofila (base, media y ápice de la hoja)

Con el objetivo de evaluar el contenido de clorofila (verdor de la hoja), mediante espectrofotometría no destructiva, se utilizó un medidor portátil de clorofila SPDA-502 PLUS 2900P, para tomar tres lecturas en la hoja media (número 5 o 6) de cada repetición. Las lecturas se realizaron en un orden específico: primero en la base de la hoja, luego en la parte media y finalmente en el ápice de la hoja, permitiendo una evaluación detallada de la distribución de la clorofila en la lámina foliar

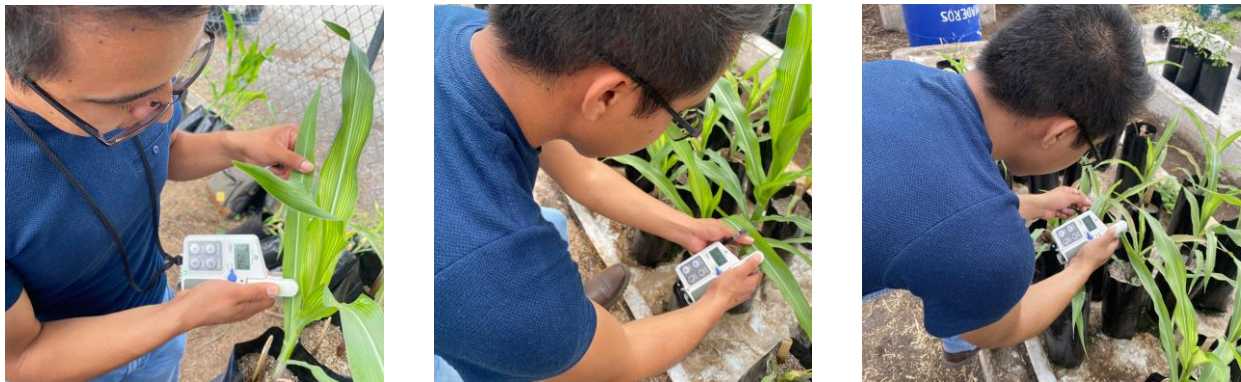


Figura 7. Toma de datos de la base, parte media y ápice de la hoja.

5.4 Ancho y delgado del tallo

Posteriormente, se procedió a la medición precisa de las variables morfométricas utilizando un Vernier calibrado, permitiendo la recopilación de datos exactos en cada repetición de los diferentes tratamientos.



Figura 8. Medición de ancho de tallo con Vernier.

5.5 Largo de la raíz

Para recabar la información de la variable se suspendió el riego un día antes, con esto se facilitó el desprendimiento del sustrato de la raíz, para que esta quedara limpia y completa, sin daño por manejo.

Se realizó un corte horizontal en la parte inferior (base del tallo) de la planta, posteriormente se cortó la bolsa de polietileno (maceta) para extraer la raíz completa. Se tomó el dato de la raíz principal con una regla milimétrica, desde la base del tallo hasta el ápice de la raíz.



Figura 9. Corte en la base la planta y medición de raíz en peso fresco.

5.6 Peso seco del tallo y de la raíz

Una vez finalizada la recolección de datos de raíces y de tallos, estos fueron doblados y segmentados y colocados en bolsas de papel de estraza debidamente etiquetadas, con el número de tratamiento y de repetición. Posteriormente las bolsas fueron trasladadas del invernadero al asoleadero del Departamento de Fitomejoramiento, donde se dispusieron sobre una tarima de madera con las bolsas abiertas para permitir un secado homogéneo, por un periodo de 15 días.

Después del secado, los tallos fueron colocados en charolas de plástico para su pesaje utilizando una balanza semianalítica de alta precisión. En cuanto a las raíces, se empleó inicialmente un proceso de cribado fino para eliminar el sustrato residual que pudo haber quedado atrapado entre las raíces. Posteriormente, las raíces limpias fueron colocadas en charolas para determinar el peso seco de cada repetición por tratamiento.



Figura 10. *Determinación del peso seco del tallo y de la raíz de cada planta.*

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados del análisis de varianza (ANVA) para las variables agronómicas evaluadas en las plántulas de maíz bajo condiciones de invernadero **Cuadros 2 y 3**, se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en las variables contenido de clorofila de la base y en el ápice de las hojas (Cbase y Cápice), también para ancho del tallo (Anctallo). Asimismo, se registraron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$), para las variables número de hojas (Nhojas), altura del tallo (ALtallo), delgado del tallo (Deltallo), peso seco raíz (PSraíz), peso seco foliar (PSfoliar).

Cuadro 2. Cuadrados medios del ANVA para variables agronómicas evaluadas en plantas de maíz (*Zea mays* L.) tratadas con NPsMgO, bajo condiciones de invernadero.

F.V.	G.L.	Nhojas	Cbase (SPAD)	Cmedia (SPAD)	Cápice (SPAD)	ALtallo (cm)
Tratamiento	4	2.78**	111.13*	34.03NS	95.39*	136.47**
Error	35	0.70	29.64	35.78	33.82	6.25
C.V (%)		18.48	20.31	17.41	18.97	20.14

** = Altamente Significativos ($P \leq 0.01$); * = Significativos ($P \leq 0.05$); NS = No hay significancia, F.V.= Fuentes de variación, G.L. = Grados libertad, C.V = Coeficiente de variación, Nhojas = Número de hojas, Cbase = Contenido de clorofila base, Cmedia = Contenido de clorofila en la parte media de la hoja, Cápice = Contenido de clorofila en el ápice, ALtallo = Altura de tallo.

Cuadro 3. Cuadrados medios del ANVA para variables agronómicas evaluadas en plántulas de maíz (*Zea mays* L.) tratadas con de NPsMgO, bajo condiciones de invernadero.

F.V.	G.L.	Anctallo (mm)	Deltallo (mm)	LRaíz (cm)	PSraíz (g)	PSfoliar (g)
Tratamiento	4	42.29*	13.34**	171.70 ^{NS}	5.09**	7.52**
Error	35	13.94	3.39	173.65	0.34	0.96
C.V (%)		31.19	20.83	20.74	32.34	55.63

** = Altamente Significativos ($P \leq 0.01$); * = Significativos ($P \leq 0.05$); NS = No hay significancia, F.V.= Fuentes de variación, G.L. = Grados libertad, C.V = Coeficiente de variación, Anctallo = Ancho del tallo, Deltallo = Delgado del tallo, LRaíz = Largo de raíz, PSraíz = Peso seco de raíz, PSfoliar = Peso seco foliar.

En el **Cuadro 4** se presentan las comparaciones de medias para las variables agronómicas evaluadas, se observaron diferencias significativas para el número de hojas y altura del tallo, destacando estadísticamente el tratamiento con 25 ppm de NPsMgO en las variables Nhojas y ALtallo, este dato confirma la importancia de este elemento en el caso específico del maíz, que influyó en la formación y expansión de las hojas, lo que pudo afectar la capacidad de la planta para realizar la fotosíntesis y producir energía.

Cuadro 4. Comparación de medias para variables agronómicas evaluadas en plantas de maíz (*Zea mays* L.) tratadas con NPsMgO bajo condiciones de invernadero.

Tratamiento (ppm)	Nhojas	Cbase (SPAD)	Cmedia (SPAD)	Cápice (SPAD)	ALtallo (cm)
0	3.87 b	22.53 b	37.22 a	30.62 a	9.67 b
25	5.25 a	24.18 b	33.48 a	34.01 a	19.56 a
50	4.87 ab	27.03 ab	34.56 a	34.17 a	11.73 b
75	4.75 ab	28.07 ab	31.58 a	27.77 a	11.58 b
100	4.00 b	32.17 a	34.92 a	26.68 b	9.50 b
$\bar{x}$	4.55	26.80	34.35	30.65	12.41
Tukey	1.20	7.82	8.59	8.36	3.59

Variables con literales diferentes en la misma columna son estadísticamente diferentes, Nhojas = Número de hojas, Cbase = Contenido de clorofila en la base de la hoja, Cmedia = Contenido de clorofila en la parte media de la hoja, Cápice = Contenido de clorofila en el ápice, ALtallo = Altura de tallo.

Además, el magnesio influye en la elongación y la división celular, lo que posiblemente afectó la altura final del tallo. Sin embargo, para la nanopartícula metálica, la concentración más baja fue la que presentó los valores más altos (25 ppm). El uso de nanopartículas metálicas se alinea con algunos estudios relacionados que evalúan el rendimiento en cultivos como el maíz y el arroz. Por ejemplo, investigaciones previas (Chernikova *et al.* 2019) han demostrado que la aplicación de nanopartículas de cobre puede producir incrementos significativos en el rendimiento de estos cultivos.

Como el magnesio es un componente clave de la clorofila, se esperaría que su disponibilidad afectará directamente su contenido en las hojas de maíz, sin embargo, la relación entre el magnesio y clorofila puede variar dependiendo de la posición en la hoja. El contenido de clorofila en la parte media de las hojas no mostró una diferencia significativa que fuera dada por la aplicación de NPs. Presentando un rango de 31.58 (75 ppm) y 37.22 (testigo) unidades SPAD. Esto da como resultado que en la parte media de la hoja puede tener una mayor capacidad para movilizar y redistribuir el magnesio a otras partes de la planta, lo que podría mantener el contenido de clorofila estable (Clavijo, 2001).

Por otro lado, la base y el ápice de la hoja pueden ser más sensibles a la disponibilidad del macroelemento debido a su alta actividad metabólica y crecimiento activo. En la base de la hoja, el magnesio puede ser limitante para la síntesis de clorofila, debido a la alta demanda de nutrientes para el crecimiento y desarrollo. En el ápice este puede ser esencial para mantener la función de procesos como la fotosíntesis y la síntesis de proteínas (Clavijo, 2001).

Importante es mencionar que no siempre son necesarias altas dosis de NPsMgO para obtener buenos resultados en las plantas de maíz. Esto se debe a que las nanopartículas pueden tener efectos diferentes en las plantas dependiendo de la dosis, la forma en que interactúan con la planta y forma de aplicación. Algunos estudios han demostrado que dosis moderadas de NPsMgO pueden ser más efectivas que dosis altas para promover el crecimiento y desarrollo de las plantas. Por ejemplo, un estudio realizado por Abbas Z *et al.* 2024 encontraron que la influencia de NPsMgO en el crecimiento del maíz, con tratamientos con

diferentes concentraciones de NPsMgO (100, 200, 500, 800 y 1000 ppm), 500 ppm sobresalió, ya que evidenció que las semillas tratadas con esta dosis de NPsMgO, al germinar, aumentaron considerablemente la altura de los brotes (Altura del tallo) en comparación con las semillas sin tratar.

Por otra parte, en la investigación elaborada por (Cai Lin et al. 2018), sobre las NPsMgO para impulsar el crecimiento de las plantas, demostró que con las concentraciones de 0 $\mu\text{g/mL}$ a 250 $\mu\text{g/mL}$, se promovió el crecimiento y contenido de clorofila. Además, se detectó un contenido elevado de Mg en los tejidos vegetales expuestos a NPsMgO, lo que sugiere que el Mg fue absorbido por las raíces de la planta y translocado a los brotes y hojas, que fueron probablemente las herramientas más importantes para causar un aumento en el contenido de clorofila, con las dosis que van desde de 0.21 y 0.12 $\mu\text{g/g}$ (brotes) a 1.21 y 0.67 $\mu\text{g/g}$ (hojas), y además estimularon el crecimiento.

En particular, se han reportado aumentos de hasta el 20% en el rendimiento del maíz después de la aplicación de nanopartículas de cobre, como se menciona en los estudios de (Hoang *et al.* 2019) y (Chernikova *et al.* 2019). Sin embargo, es importante destacar que las altas concentraciones de nanopartículas metálicas pueden tener efectos tóxicos en las plantas, mientras que las bajas concentraciones suelen ser más efectivas y estadísticamente significativas. Esto sugiere que la concentración óptima de nanopartículas es crucial para lograr resultados positivos en el rendimiento de los cultivos, y que es necesario realizar más investigaciones para determinar las dosis adecuadas para cada tipo de cultivo y nanopartícula.

En el **Cuadro 5** se presenta la comparación de medias por tratamiento, se observó que, con 25 ppm al aplicarlo de manera directa en las plántulas de maíz, afectó significativamente el ancho del tallo con 14.42 mm siendo el mayor valor, peso seco de la raíz con 3.08 g, y el peso seco foliar con 3.38 g. En el crecimiento del sistema radicular (variable longitud de raíz) no se obtuvieron diferencias significativas, sin embargo, con los tratamientos de 50, 75 y 100 ppm de NPsMgO se observó el mejor desarrollo, con 65.50, 67.87 y 66.87 cm, respectivamente

Cuadro 5. Comparación de medias para variables agronómicas evaluadas en plántulas de maíz (*Zea mays* L.) con tratamientos de NPsMgO bajo condiciones de invernadero.

Tratamiento (ppm)	Anctallo (mm)	Deltallo (mm)	LRaíz (cm)	PSraíz (g)	PSfoliar (g)
0	10.76 ab	8.60 ab	60.11 a	1.15 b	1.01 b
25	14.42 a	9.53 a	57.18 a	3.08 a	3.38 a
50	14.06 ab	10.36 a	65.50 a	1.98 b	1.88 b
75	11.67 ab	8.83 ab	67.87 a	1.68 b	1.43 b
100	8.93 b	6.88 b	66.87 a	1.15 b	1.10 b
$\bar{x}$	11.97	8.84	63.51 a	1.81	1.76
Tukey	5.36	2.64	18.94	0.84	1.41

Variables con literales diferentes en la misma columna son estadísticamente diferentes, Anctallo = Ancho del tallo, Deltallo = Delgado del tallo, LRaíz = Largo de raíz, PSraíz = Peso seco de raíz, PSfoliar = Peso seco foliar.

Anteriormente, se reportó que la exposición a 10-150 $\mu\text{g/ml}$ de nanopartículas de MgO, afectó negativamente los parámetros morfológicos y bioquímicos del frijol (*Phaseolus vulgaris*) de forma dependiente de la concentración. Se observó una reducción en la longitud de la raíz, así como en la relación brote/raíz, tras la exposición a nanopartículas de MgO. Se observó también una reducción simultánea y significativa en la acumulación de antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos. Además, la acumulación de clorofila, carbohidratos y proteínas se redujo considerablemente tras la exposición a nanopartículas de MgO (Sharma *et al.* 2021). Esto sugiere que la respuesta de las plantas a los tratamientos puede ser dependiente de la dosis.

En el **Cuadro 6** se presentan los coeficientes de correlación de Pearson para las variables en estudio. Se observó una correlación positiva ($P \leq 0.01$) entre el número de hojas y la altura del tallo ($r=0.5819^{**}$) ya que, al proporcionar magnesio de manera más eficiente y accesible para las plantas, se pudo estimular el crecimiento y desarrollo foliar. La correlación entre el número de hojas y el ancho del tallo ($r=0.6086^{**}$) y el Deltallo ($r=0.4120^{**}$) indican que posiblemente el tallo proporciona más soporte y las hojas le aportan nutrientes derivados de la fotosíntesis.

La correlación encontrada entre la Cápice y el número de hojas ($r=0.3319^*$) indica que la mayor disponibilidad de nutrientes estimula el crecimiento de la planta, lo que se refleja en un mayor número de hojas. Esto a su vez se correlaciona positivamente con el peso seco foliar ($r=0.5946^*$), y con el peso seco raíz ($r=0.5810^*$). Esto indica que la mayor disponibilidad de nutrientes conduce a un mayor crecimiento y desarrollo de la planta, tanto en la parte foliar como en la raíz.

La correlación negativa entre el diámetro del tallo y el contenido de clorofila en la base de la hoja (Cbase) con un coeficiente de correlación de $r= -0.3094^*$, sugiere que a medida que aumenta el diámetro del tallo, disminuye el contenido de clorofila en la base de la hoja. Esto podría indicar que el crecimiento del tallo puede estar relacionado con una menor inversión de recursos en la síntesis de clorofila en la base de la hoja.

Por otra parte, se encontró correlación entre el contenido de clorofila en la parte media de la hoja (Cmedia) y la clorofila del ápice (Cápice) ($r=0.3587^*$), esto se debe a que la distribución de clorofila en la hoja puede ser relativamente uniforme, lo que sugiere que las partes media y apical de la hoja pueden tener una relación en términos de contenido de clorofila. Esto puede indicar que la planta está regulando de manera coordinada la síntesis de clorofila en diferentes partes de la hoja.

Las correlaciones entre el contenido de clorofila en el ápice de la hoja con la altura del tallo ($r=0.3034^*$), ancho del tallo ($r=0.6164^{**}$), delgado del tallo (0.3074^*), peso seco foliar ($r=0.3412^*$) y peso seco de raíz ($r=0.3912^*$) sugieren que el contenido de clorofila en el ápice de la hoja está relacionado con el crecimiento y desarrollo de la planta. Esto podría deberse a que la clorofila en el ápice de la hoja tiene un papel importante en la fotosíntesis y la producción de energía para la planta, lo que a su vez puede influir en el crecimiento y desarrollo de la planta, incluyendo las variables mencionadas. También puede indicar que la planta está utilizando eficientemente la energía producida por la fotosíntesis para impulsar su crecimiento y desarrollo.

Las correlaciones entre la variable altura del tallo están directamente relacionadas con el ancho y delgado del tallo, con coeficientes de correlación de $r=0.5515^{**}$ y $r=0.3250^{*}$, respectivamente. Esto indica que a medida que aumenta la altura del tallo, también aumentan el ancho y diámetro del tallo. Además, estas variables parecen influir en el peso seco de raíz ($r=0.8164^{**}$) y peso seco foliar ($R=0.7223^{**}$), lo que concuerda que el crecimiento y desarrollo del tallo tienen un impacto en la biomasa de la planta, tanto en la parte aérea (hojas) como en la parte subterránea (raíz). Esto podría deberse a que un tallo más alto y robusto permite una mayor exposición a la luz solar y una mayor capacidad para transportar nutrientes y agua.

El ancho del tallo mostró correlación positiva con el diámetro del tallo ($r=0.7442^{*}$), lo que sugiere que a medida que aumenta el ancho del tallo, también aumenta su diámetro. Además, el ancho del tallo se correlacionó positivamente con el peso seco de raíz ($r=0.6607^{*}$) y el peso seco foliar ($r=0.5974^{*}$).

Un resultado similar en la correlación delgado del tallo con el peso seco de raíz ($r=0.4723^{**}$) y con la variable peso seco foliar ($r=0.4154^{**}$), indica que el grosor del tallo está directamente relacionado con el desarrollo de la biomasa en la planta, tanto en la parte subterránea como en la aérea. Estas correlaciones muestran que el diámetro del tallo es un factor importante en la distribución de recursos y crecimiento general de la planta.

La correlación entre el peso seco de raíz y el peso seco foliar ($r=0.8318^{**}$) sugiere que el crecimiento y desarrollo de la raíz y las hojas están íntimamente ligados. Esto se debe a que la raíz y las hojas son partes interconectadas de la planta que se benefician mutuamente: la raíz absorbe recursos esenciales del suelo que se transportan a las hojas, mientras que las hojas producen azúcares y energía a través de la fotosíntesis que se distribuyen a la raíz y otras partes de la planta (Taiz *et al.* 2007). Esta interdependencia explica la fuerte correlación entre su crecimiento y desarrollo.

Cuadro 6. Coeficientes de correlación de Pearson para las variables agronómicas evaluadas en maíz (*Zea mays* L.) con tratamientos de NPsMgO, bajo condiciones de invernadero.

Variables	Cbase (SPAD)	Cmedia (SPAD)	Cápice (SPAD)	ALtallo (cm)	Anctallo (mm)	Deltallo (mm)	LRaíz (cm)	PSraíz (g)	PSfoliar (g)
Nhojas	-0.1897 ^{NS}	-0.0226 ^{NS}	0.3319*	0.5819**	0.6086**	0.4120**	0.0947 ^{NS}	0.5810**	0.5946**
Cbase		0.1922 ^{NS}	-0.0294 ^{NS}	-0.2836 ^{NS}	-0.1822 ^{NS}	-0.3094*	0.0444 ^{NS}	-0.1008 ^{NS}	-0.1568 ^{NS}
Cmedia			0.3587*	-0.0519 ^{NS}	0.2347 ^{NS}	0.0751 ^{NS}	0.0255 ^{NS}	-0.1048 ^{NS}	-0.1488 ^{NS}
Cápice				0.3034*	0.6164**	0.3074*	-0.0908 ^{NS}	0.3912*	0.3412*
ALtallo					0.5515**	0.3250*	-0.0490 ^{NS}	0.8164**	0.7223**
Anctallo						0.7442**	0.2076 ^{NS}	0.6607*	0.5974*
Deltallo							0.2388 ^{NS}	0.4723**	0.4154**
LRaíz								-0.1292 ^{NS}	-0.1538 ^{NS}
PSraíz									0.8318**

**= Altamente Significativos ($P \leq 0.01$); *= Significativos ($P \leq 0.05$), NS= No hay significancia, Nhojas = Número de hojas, Cbase = Contenido de clorofila en la base de la hoja, Cmedia = Contenido de clorofila en la parte media de la hoja, Cápice = Contenido de clorofila ápice de la hoja, ALtallo = Altura de tallo, Anctallo = Ancho del tallo, Deltallo = Delgado del tallo, LRaíz = Largo de raíz, PSraíz = Peso seco de raíz, PSfoliar = Peso seco foliar.

VII. CONCLUSIONES

La aplicación de nanopartículas de óxido de magnesio (NPsMgO) en maíz, mostró efectos significativos en el crecimiento y desarrollo de las plantas.

La concentración de 25 ppm presentó los valores más altos en las variables ancho del tallo, delgado del tallo, peso seco foliar y peso seco de raíz, lo que sugiere que dosis bajas son más efectivas para promover el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Se observó que la relación entre el magnesio y el contenido de clorofila en las hojas puede variar dependiendo de la posición en la hoja, lo que indica que las plantas tienen mecanismos para movilizar y redistribuir el magnesio según sus necesidades.

Se obtuvo una correlación positiva importante entre el número de hojas y la altura del tallo, indicando que el crecimiento de las plantas depende de su habilidad para capturar luz por las hojas.

Asimismo, hubo una fuerte correlación positiva entre el peso seco de raíz y el peso seco foliar, mostrando una estrecha relación entre el desarrollo radicular y foliar. Además, la correlación entre la clorofila del ápice y el ancho del tallo indica que el contenido de clorofila en el ápice de la hoja está relacionado con el grosor del tallo.

En general, los resultados de este estudio proponen que el uso de NPsMgO puede ser una estrategia efectiva para mejorar el crecimiento y desarrollo de las plantas de maíz, siempre y cuando se utilicen dosis adecuadas y se considere la forma en que interactúan con la planta. Estos hallazgos pueden tener implicaciones importantes para la agricultura y la producción de alimentos, y pueden ser útiles para desarrollar nuevas estrategias de fertilización y manejo de cultivos.

VIII. RECOMENDACIONES

Los resultados sugieren que una concentración de 25 ppm de NPsMgO en el tratamiento de plántulas de maíz, demostró ser efectiva para promover el crecimiento y desarrollo de las plantas. Es fundamental monitorear y evaluar las variables agronómicas clave, como el área foliar, altura del tallo y ancho del tallo, con el fin de determinar el impacto del tratamiento con NPsMgO en la productividad del cultivo.

La dosis y frecuencia de aplicación de NPsMgO por planta, pueden ajustarse según factores como el tipo de suelo, el clima y la variedad de maíz.

Además, se requiere más investigación para determinar la dosis óptima y el método de aplicación más efectivo para diferentes cultivos.

La aplicación foliar mediante pulverización directa sobre las hojas podría permitir una absorción más rápida y eficiente de las nanopartículas. Por otro lado, la aplicación en el suelo mediante el sustrato podría permitir una liberación lenta y sostenida de las nanopartículas.

También se podría considerar aplicar en etapas específicas de crecimiento, como en la germinación, crecimiento vegetativo o floración, para aprovechar los beneficios en momentos críticos del desarrollo de la planta.

Sería beneficioso realizar investigaciones adicionales sobre la interacción entre las nanopartículas y factores ambientales, como el tipo de suelo y el clima, para comprender mejor su efecto en la productividad del maíz y optimizar su aplicación en diferentes ambientes. La aplicación de estos iones podría ser una estrategia efectiva para mejorar la productividad, lo que podría tener implicaciones importantes para la agricultura sostenible.

IX. LITERATURA CITADA

- Abbas, Z., Hassan, M.A., Huang, W., Yu, H., Xu, M., Chang, X., Fang, X., and Liu, L. (2024). Influence of Magnesium Oxide (MgO) Nanoparticles on Maize (*Zea mays* L.). *Agronomy* 14, 617. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030617>
- Cai, L., Liu, M., Liu, Z., Yang, H., Sun, X., Chen, J., Xiang, S. and Ding, W. (2018). MgONPs Can Boost Plant Growth: Evidence from Increased Seedling Growth, Morpho-Physiological Activities, and Mg Uptake in Tobacco (*Nicotiana tabacum* L.), 23 (12), 3375. <https://doi.org/10.3390/molecules23123375>
- Cakmak, I. and Yazici, A.M. (2010). Magnesium: A forgotten element in crop production. *Better Crops*. 94:23–25.
- Chernikova, O. V., Ampleeva, L. E., and Mazhaisky, Y. A. (2019). Effect of Selenium Nanoparticles on the Formation of Corn Yield. *Russian Agricultural Sciences*, 45(3), 256-259.
- Clavijo, J. (2001). Metabolismo de los nutrientes en las plantas. En *Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Fertilidad de suelos: Diagnóstico y control* (págs. 13-28). Obtenido de <http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/4922/1/216.1.pdf>
- FIRA. (2024). Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial. Subdirección de Análisis del Sector. (2024). Panorama agroalimentario maíz 2024.
- Hermans, C., M. Vuylsteke, F. Coppens, S.M. Cristescu, F.J. Harren, D. Inzé, and N. Verbruggen. (2010). Systems analysis of the responses to long-term magnesium deficiency and restoration in *Arabidopsis thaliana* *New Phytol.*, 187 (2010), pp. 132-144.

- Hoang, S. A., Nguyen, L. Q., Nguyen, N. H., Tran, C. Q., Nguyen, D. V., Vu, Q. N., and Phan, C. M. (2019). Metal nanoparticles as effective promoters for Maize production. *Scientific reports*, 9(1), 1-8.
- Jhansi, K., Jayarambabu, N., Reddy, K. P., Reddy, N. M., Suvarna, R. P., Rao, K. V., Kumar, V. R., and Rajendar, V. (2017). Biosynthesis of MgO nanoparticles using mushroom extract: Effect on peanut (*Arachis hypogaea* L.) seed germination. *3 Biotech*, 7(4), 263. <https://doi.org/10.1007/s13205-017-0894-3>
- Lateef, A., Nazir, R., Jamil, N., Alam, S., Shah, R., Khan, M., and Saleem, M. (2016). Synthesis and characterization of zeolite-based nano– composite: An environment friendly slow-release fertilizer. *Microporous and Mesoporous Materials*, 232, 174-183. doi: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2016.06.020>
- Li, J., Hu, X., Zhang, R., Li, Q., Xu, W., Zhang, L. and Wang, M. (2023). The plasma membrane magnesium transporter CsMGT5 mediates magnesium uptake and translocation under magnesium limitation in tea plants (*Camellia sinensis* L.). *Scientia Horticulturae* 310, 111711.
- Lira-Saldívar, R. H., Arguello, B. M., Villarreal, G. D. los S., and Reyes, I. V. (2018). Potential of nanotechnology in agriculture. *University Act*, 28 (2), 9-24. <https://doi.org/10.15174/au.2018.1575>
- Mengutay M., Ceylan Y., Kutman B. U., and Cakmak I., (2013). Adequate magnesium nutrition mitigates the adverse effects of heat stress on maize and wheat. *Plant and Soil* 368(1-2). <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-013-1761-6>
- Mihail C., R. (2003). Nanotechnology: convergence with modern biology and medicine, *Current Opinion in Biotechnology*, Volume 14, Issue 3, Pages 337-346, ISSN 0958-1669, [https://doi.org/10.1016/S0958-1669\(03\)00068-5](https://doi.org/10.1016/S0958-1669(03)00068-5).
- Moreno R., A. (2007). Elementos nutritivos. Asimilación, funciones, toxicidad e indisponibilidad en los suelos. Editorial Libros en Red. pp. 30-35.

- Prasad, R., Kumar, V., and Prasad, K. S. (2014). Nanotechnology in sustainable agriculture: Present concerns and future aspects. *African Journal of Biotechnology*, 13(28), 2862-2870.
- Ross, M. (2004). Importancia del magnesio para altos rendimientos sostenibles en palma de aceite. *Palmas* 25:98-104. Doi: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1071>
- Sánchez S., L. F. (1981). Aspectos sobre nutrición con magnesio en el cultivo de arroz (*Oriza sativa* L.) en los Llanos Orientales. Instituto Colombiano Agropecuario, ICA.
- Sharma, P. Gautam, A, Kumar, V., and Praveen, G. (2021). In vitro exposure of magnesium oxide nanoparticles adversely affects the vegetative growth and biochemical parameters of black gram. Volumen 16. ISSN 2215-1532. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100483>
- Sharma, P., Gautam, A., Kumar, V., and Praveen, G. (2022). MgO nanoparticles priming promoted the growth of black chickpea. *Journal of Agriculture and Food Research*, 10, 100435. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100435>
- Shinde, S., Paralikar, P., Ingle, A. P., and Rai, M. (2020). Promotion of seed germination and seedling growth of *Zea mays* by magnesium hydroxide nanoparticles synthesized by the filtrate from *Aspergillus niger*. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(1), 3172-3182. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2018.10.001>.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2007). *Fisiología vegetal* (Vol. 10). Universitat Jaume I.
- Terrón, P. U. (2011). El calcio y el magnesio en la fertilización de los cultivos. *Vida rural*. 332:58-61.
- Vistoso, E., y Martínez-Lagos, J. (2020). Magnesio disponible y fertilización en suelos de la Región de Los Ríos (Informativo N° 261). Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA).

- Wang, Z., Hassan, M.U., Nadeem, F., Wu, L., Zhang, F. and Li, X. (2020). Magnesium fertilization improves crop yield in most production systems: a meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*, 1727.
- Yadollahi, A. Arzani, K. y Khoshghalb, H. (2010). El papel de la nanotecnología en la gestión postcosecha de cultivos hortícolas. *Acta Hortic.* 875, 49-56 doi: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2010.875.4>