

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Efectos de las Nanopartículas de Óxido de Magnesio en Variables de Calidad Fisiológica de Semillas y de Plántulas de Maíz (*Zea mays ssp*).

Por:

**DAYNER JESÚS HERNÁNDEZ GONZÁLEZ**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de

**INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN**

Saltillo, Coahuila, México

Marzo, 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA  
DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Efectos de las Nanopartículas de Óxido de Magnesio en Variables de Calidad Fisiológica  
de Semillas y de Plántulas de Maíz (*Zea mays L.*).

Por:

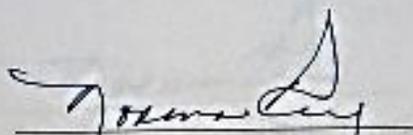
**DAYNER JESÚS HERNÁNDEZ GONZÁLEZ**

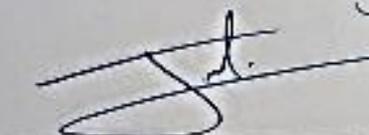
TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de

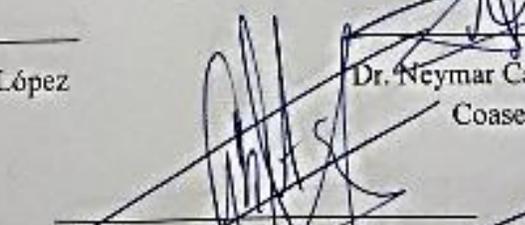
**INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN**

Aprobada por el Comité de Asesoría:

  
Dra. Norma Angélica Ruiz Torres  
Asesor Principal

  
Dr. Josué Israel García López  
Coasesor

  
Dr. Neymar Camposeco Montejo  
Coasesor

  
Dr. José Antonio González Fuentes  
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Marzo, 2022



### **Declaración de no plagio**

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

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

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

Pasante

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Dayner Jesús Hernández González', is written over a horizontal line. The signature is stylized and somewhat cursive.

Dayner Jesús Hernández González

## DEDICATORIA

### A MIS PADRES

**Sra. Carmen González Escalante** por darme su apoyo y esforzarse día a día, por madrugar, por tomar su sombrilla y a pesar del intenso sol salir a vender esos ricos tamales, que a pesar del dolor seguir adelante y no darse por vencida, gracias por creer, por escucharme, pero sobre todo ¡gracias por ser mi madre!

**Sr. Arsenio Hernández Velázquez** por brindar todo su esfuerzo, por soportar esas ampollas en sus manos, por tener esa capacidad de poder hacer lo que sea y pesar de todo no rajarse, me siento muy orgulloso de ser su hijo, como quisiera a llegar ser la mitad de lo que es usted, muchas gracias papa, ¡es un orgullo tenerlo como padre!

A ti abuelo el **Sr. Elías Hernández Morales** por creer y apoyarme, por tus sabios consejos, y sobre todo por esos cuentos de niño que crearon mi gran imaginación y sobre todo por ser mi inspiración y ejemplo para siempre trabajar duro, te prometí algo y luchare como tu hasta lograrlo.

### A MIS HERMANOS

Al **Sr. Josué Hernández González** por apoyarme y sobre todo por tus palabras de aliento, por tu compañía y cariño, gracias por cubrirme en el trabajo para yo poder estudiar.

A la **Srta. Doris del Carmen Hernández González** por tu apoyo, por tu admiración, cariño y apoyo incondicional, espero con esto ser tu aspiración para conseguir tus metas y sueños.

## AGRADECIMIENTOS

A **Dios** por permitirme llegar hasta este momento, por enseñarme a tomar buenos consejos, a diferenciar aquello que no tiene precio, como el amor y unas palabras de aliento, de esas que te hacen levantarte de lo más bajo, seguir luchando por lo que yo había anhelado, por dejarme ser mi abrigo y luz en las noches frías y oscuras de este camino, por darme consuelo y aliento a seguir adelante, y cuidarme en las dificultades que sobrelleve e interceder por mí a través de otras personas que formaron parte de este proceso.

Gracias, mi Cristo por dejarme bien en claro; *“si siete veces caigo siete me levanto”* (Corrales).

A mi Alma Terra Mater **UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRIARIA ANTONIO NARRO** por darme la oportunidad de formar mi vida profesional en su corazón, así como a todos los profesores de esta máxima casa de estudios que me brindaron sus conocimientos y apoyo.

A mis benditos Padres cafeticultores y campesinos **Sr. Arsenio Hernández Velázquez** y **Sra. Carmen González Escalante**, por su esfuerzo, sacrificio y dedicación.

A mis queridos hermanos **Sr. Josué Hernández González** y **Srta. Doris del Carmen Hernández González** por su apoyo y comprensión.

A la **Srta. Ángela Greysi Gutiérrez Ramírez** por formar parte de este proceso brindando apoyo incondicional, así como por el cariño demostrado.

A la **Dra. Norma Angélica Ruíz Torrez** por dedicarme parte de su tiempo, por compartir parte de sus conocimientos, así como la paciencia, el apoyo y dedicación brindada durante el desarrollo de esta etapa final de mi vida universitaria.

A mis amigos **Anselmo de la Cruz Juárez, Josué Figueroa López, Samuel Reveló Ruíz González** entre otros por el apoyo y compañía en las buenas y malas durante este proceso, por compartir angustias desvelos, risas y por mantener su palabra de llagar juntos hasta el final.

Al **Ing. Edgar González Verdugo y esposa** por cuidar de mí, brindar su apoyo en mis primeros pasos dentro de la universidad.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE CUADROS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
RESUMEN .....	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVO.....	2
III. HIPÓTESIS .....	2
IV. REVISIÓN DE LITERATURA .....	3
4.1 Magnesio (Mg <sup>++</sup> ).....	3
4.2 Funciones del Magnesio.....	3
4.3 Deficiencias de Magnesio.....	4
4.4 Deficiencia de Mg en Maíz .....	5
4.5 Toxicidad del Magnesio.....	5
4.6 Magnesio y sus antagonismos .....	6
4.7 Nanopartículas .....	6
4.8 Nanopartículas en la germinación.....	7
V. MATERIALES Y MÉTODOS .....	10
5.1 Localización.....	10
5.2 Bioensayo .....	10
5.3 Preparación de suspensiones de NPsMgO.....	10
5.4 Imbibición de semillas con NPsMgO .....	10
5.5 Siembra entre papel.....	11
5.6 Determinación de variables.....	11
5.6.1 Primer conteo de plántulas normales.....	12
5.6.3 Segundo conteo de plántulas.....	12
5.6.3 Análisis estadístico .....	13
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	14
VII. CONCLUSIONES .....	23
VIII. BIBLIOGRAFÍA.....	25
IX. ANEXOS .....	29

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Tratamientos aplicados a semillas de maíz.....	11
Cuadro 2. Cuadros medios del análisis de varianza para variables evaluadas en bioensayo para determinar el efecto de las NPsMgO en la germinación y acumulación de materia seca en maíz.....	15
Cuadro 3. Cuadros medios del análisis de varianza para variables evaluadas en bioensayo para determinar el efecto de las NPsMgO en el desarrollo de plúmula y radícula y en el contenido de clorofila en maíz.....	16
Cuadro 4. Comparación de medias de variables evaluadas en bioensayo para determinar el efecto de las NPsMgO, aplicadas a semillas de maíz durante la imbibición.....	19
Cuadro 5. Comparación de medias de variables evaluadas en bioensayo para determinar el efecto de las NPsMgO, aplicadas a semillas de maíz durante la imbibición.....	20
Cuadro 6. Coeficientes de correlación Pearson de las variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz ( <i>Zea mays</i> L.), tratadas con NPsMgO .....	22

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Respuesta del vigor de germinación de semillas de Zea mays a tratamientos con diferentes concentraciones de NPsMgO.....	29
Figura 2. Respuesta de la variable porcentaje de germinación de semillas de Zea mays, a diferentes concentraciones de NPsMgO.....	29
Figura 3. Respuesta de la variable plántulas de alto vigor a diferentes concentraciones de NPsMgO.....	30
Figura 4. Respuesta de la variable plántulas de bajo vigor a diferentes concentraciones de NPsMgO.....	30

## RESUMEN

El presente trabajo se realizó en el Laboratorio de Fisiología y Bioquímica de Semillas del Centro de Capacitación y Desarrollo de Tecnología de Semillas, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), ubicada a 6 km al sur de Saltillo, Coahuila, México. La investigación se orientó a determinar el efecto de la aplicación de nanopartículas de óxido de magnesio (NPsMgO), a través de la imbibición de semillas de un híbrido de maíz, para analizar e identificar el efecto promotor o inhibidor en la germinación, el desarrollo de plántulas y el contenido de clorofila o verdor. Se estableció un bioensayo bajo un diseño completamente al azar, con 4 repeticiones de 25 semillas cada uno. Las semillas se dejaron imbibir en suspensiones con diferentes concentraciones de NPsMgO: 0, 50, 100, 200, 300, 400, 500 y 1000 ppm, para su posterior siembra entre papel Anchor. La evaluación de las plántulas se realizó a los 4, 7 y 8 días después de la siembra. Para el análisis estadístico se realizó un análisis de varianza y comparación de medias mediante la Prueba Tukey ( $P \leq 0.05$ ), con el paquete estadístico SAS (2004). Los resultados indican que en general no se presentó un efecto promotor significativo en las variables evaluadas. Al imbibir semillas en suspensión de NPsMgO a 50 ppm, se incrementó ligeramente el peso seco de radícula, la longitud de plúmula y de radícula, y se redujo a cero el porcentaje de semillas sin germinar. Una reducción significativa se observó en la variable porcentaje de vigor de germinación en la dosis de 100 ppm de NPsMgO, así como en el porcentaje de germinación con 1000 ppm. La variable plántulas de alto vigor, es la única que presentó un incremento significativo (89 %) con el tratamiento de 400 ppm, con respecto al testigo que presentó 70 %. El contenido de clorofila no incrementó al aumentar la concentración de NPsMgO, más bien se observó un efecto negativo, reduciendo el verdor de las plántulas al incrementar la dosis a 1000 ppm. Se presentó una correlación positiva significativa entre longitud de plúmula y contenido de clorofila.

**Palabras clave:** nanopartículas, óxido de magnesio, imbibición, plántula y radícula.

## I. INTRODUCCIÓN

La nanotecnología (NT) se aplica a diversas áreas de investigación, como la biomedicina, farmacéutica, industrias alimentarias y la agricultura. La NT resulta como respuesta tecnológica a las necesidades que actualmente se están presentando, el aumento de la población mundial y con ello a la necesidad de cubrir y abastecer de alimento necesario. La NT tiene la capacidad de mejorar áreas agrícolas, brindando herramientas para mejorar la capacidad de absorción de nutrientes y potencializar el crecimiento en las plantas, así como la detección rápida de enfermedades en los cultivos, previniendo el uso indiscriminado de agroquímicos que año con año incrementan la contaminación de nuestros suelos, y generan problemáticas para el desarrollo de los cultivos.

Las nanopartículas (NPs) tienen propiedades que son determinadas por su tamaño y forma, que prometen mayor absorción y translocación, a diferencia de los productos que son de uso convencional, y que presentan barreras para mejorar las características fisiológicas de un cultivo.

El Mg es un macroelemento definido como átomo central de la molécula de clorofila y además es considerado como el nutriente que puede ayudar a mejorar el desarrollo de las plantas.

Considerando lo anterior, se torna necesario disponer de la aplicación de esta tecnología en los procesos de la germinación y desarrollo de plantas, para mejorar las etapas fisiológicas del cultivo, desde su siembra hasta la cosecha. Este trabajo se orientó a la investigación relacionada al uso de NPsMgO para identificar su respuesta promotora en los procesos relacionados con la germinación y el desarrollo de plántulas de maíz (*Zea mays ssp*), y con ello generar aportaciones a la aplicación de NPsMgO en la agricultura.

## **II. OBJETIVO**

Determinar el efecto de las nanopartículas de óxido de magnesio (NPsMgO), en los procesos fisiológicos relacionados con el vigor, el desarrollo de plántulas y el contenido de clorofila en maíz.

## **III. HIPÓTESIS**

H<sub>0</sub>: Tratar las semillas durante la fase de imbibición con NPsMgO, incrementa el vigor de las plántulas, el contenido de clorofila, y la acumulación de materia seca de plúmula y de radícula, en maíz híbrido.

H<sub>1</sub>: Tratar las semillas durante la fase de imbibición con NPsMgO, no incrementa el vigor de las plántulas y el contenido de clorofila, ni mejora la acumulación de materia seca de plúmula y de radícula, en maíz híbrido.

## IV. REVISIÓN DE LITERATURA

### 4.1 Magnesio ( $Mg^{++}$ )

A lo largo de tiempo de investigación respecto a los procesos y funciones que realiza una planta, se ha obtenido información sobre las funciones que realizan los macronutrientes y los micronutrientes (**Mengel y Kirkby, 2000**). El Mg es un macronutriente secundario junto con el Ca y el S. A diferencia de N, P, K que se consideran macronutrientes primarios (**Pérez, 2017**). El mismo autor menciona una clasificación de acuerdo con sus funciones bioquímicas y fisiológicas, destacando cuatro grupos básicos:

G1: Nutrientes que forman parte de compuestos orgánicos: N y S.

G2: Nutrientes importantes en el almacenamiento de energía o en la integridad estructural: P, Si, B.

G3: Nutrientes que aparecen en forma iónica: K, Ca, Mg, Cl, Mn, y Na.

G4: Nutrientes Implicados en reacciones Redox: Fe, Zn, Cu, Ni, y Mo.

### 4.2 Funciones del Magnesio

Como función biológica más importante y conocida del magnesio (Mg) se encuentra su papel como átomo central en la molécula de la clorofila, desempeña función esencial en la síntesis proteica, sirviendo de puente para la agregación de las subunidades ribosomales. Participa en la formación de varios pigmentos, e influye en la actividad de las fosfatasas, que se encuentran implicadas en la formación de los esteres fosfóricos de los azúcares (**Piaggese y Sequi, 2004**).

Las enzimas que intervienen en la fotosíntesis requieren Mg como activador, también es activador en las enzimas que participan en la síntesis de los ácidos nucleicos (DNA y RNA), a partir de los nucleótidos polifosfatos (**Rodríguez y Buitrago, 2019**). Los mismos autores mencionan que del 6 % al 25 % del Mg es destinado a la síntesis de clorofila, del 5 % al 10 % a la síntesis de pectatos en las paredes celulares o sales que precipitan en la vacuola, y el resto 60 % al 90 % es extractable con agua.

El Mg es muy móvil en la planta e importante para diferentes procesos del metabolismo de la planta.

- Es esencial en el proceso de la fotosíntesis y la fijación de CO<sub>2</sub> como coenzima.
- Es fundamental en todos los procesos de fosforilación de la planta, promoviendo la transferencia, conversión y acumulación de la energía.
- Tiene efecto activador sobre diversas enzimas, como la glutamina sintetasa, esencial en la unión del amonio con carbohidratos en la formación de aminoácidos como la glutamina.
- Regula el balance energético de las plantas, porque es necesario para la formación de puentes entre enzimas y el portador de energía ATP.
- Influye en la formación de ARN, y con ello la transformación de la información genética en proteínas.
- Es un componente de la fitina, la cual es un acumulador de fósforo de baja energía (fósforo de fitina), importante para la germinación de la semilla.
- Es un componente estructural integrado en los ribosomas y la matriz del núcleo celular y contribuye a la estabilización de la membrana celular.
- Participa en la formación de las paredes celulares.
- Tiene propiedades hidratantes e influencia con ello el balance hídrico y la eficacia de las enzimas (**Cakmak y Yazici, 2010**).

El Mg constituye el pigmento verde que funciona como aceptador de la energía lumínica, entre el 15 % y 20 % del contenido de este nutriente se encuentra en las áreas verdes, predomina en semillas, tejidos meristemáticos y frutos (**Moreno, 2007**).

### **4.3 Deficiencias de Magnesio**

Como toda deficiencia presenta una sintomatología, se presenta primero en las hojas más viejas para después de manera eventual en las más jóvenes, manifestándose franjas o clorosis intervenales que en los casos más graves de carencia se necrosan. Algunos cultivos son muy

sensibles a la deficiencia de magnesio, entre ellos se encuentra el maíz, repollo, nabo, drupáceas, vid, manzana, melón, tomate, remolacha azucarera (**Piaggese y Sequi, 2004**).

La deficiencia de Mg primero afecta el nivel de clorofila, o la fotosíntesis o bien la síntesis de proteína (**Cakmak y Yazici, 2010**).

#### **4.4 Deficiencia de Mg en maíz**

La ausencia de Mg es caracterizada por una clorosis en hojas viejas, entre las nervaduras principalmente. La carencia de magnesio persiste, las hojas sufren pérdida más abundante de su color verde y se presentan un amarillamiento en los bordes de las hojas (**Pérez, 2017**). En cereales la base de las primeras hojas presenta pequeñas manchas verdes oscuras, siendo estas de acumulación de clorofila, que se destaca contra el color pálido amarillo del resto del área foliar. A medida que las plantas se van desarrollando, las hojas de maíz asumen una apariencia más moteada a diferencia de otros cereales (**Mengel y Kirkby, 2000**).

**Vistoso y Martínez (2020)** mencionan los principales síntomas asociados a la deficiencia del Mg dentro de las plantas: retraso del crecimiento y tallos delgados y largos. Bajo condiciones severas de esta deficiencia, la clorosis evoluciona a franjas de color café (como óxido en las hojas viejas), las puntas y los márgenes de las hojas se tornan café oscuro y se necrosan, provocando la muerte prematura de las células del tejido foliar.

Las raíces se ramifican y alargan excesivamente, por lo que también pueden presentar una reducción intensa, además las hojas se tuercen hacia arriba a lo largo de los bordes (**Moreno, 2007**).

#### **4.5 Toxicidad del Magnesio**

La toxicidad por magnesio es muy rara en los cultivos de invernadero y viveros, en altos niveles, este micronutriente compite con el calcio y el potasio para ser absorbido por la planta, pudiendo llegar a causar una deficiencia (**Chen, 2021**).

#### 4.6 Magnesio y sus antagonismos

La deficiencia de Mg en las plantas se conduce por una competencia entre nutrientes **Schimaski (1981)**, donde no solo la absorción si no también la translocación de Mg de las raíces a las partes aéreas de las plantas se llega a restringir por el Ca y el K<sup>+</sup>. Bajos niveles de nutrición de K suministrados a plantas incrementan los contenidos de Mg (**Grimme et al., 1983**).

Los iones de Mg se presentan comprometidos al existir un exceso de otras especies catiónicas especialmente K y NH<sub>4</sub>, presentándose efectos de baja absorción en suelos ácidos y bajo nivel de pH, en consecuencia, el Mg<sup>2+</sup> no solo se deprime su absorción por la concentración de H<sup>+</sup>, sino los niveles crecientes de Al<sup>+++</sup> en el suelo (**Grimme, 1983**). **Mengel y Kirkby (2000)** mencionan se restringe la absorción de Mg<sup>2+</sup> al existir altas concentraciones de iones de K, NH<sub>4</sub> y Ca<sup>2+</sup>, o sus combinaciones.

#### 4.7 Nanopartículas

La aplicación de la NT al panorama agroalimentario lo convierte en uno de los sectores de más rápido crecimiento a través de la innovación y creación tecnológica aplicada, con el enfoque de producir la cantidad y calidad de alimentos suficientes para la población que incrementa mundialmente, convirtiéndose en un desafío en aumento. A consecuencia del uso indiscriminado de agroquímicos la degradación de agroecosistemas, y la generación de resistencia a los pesticidas por insectos y microorganismos fitopatógenos, surgen como avance tecnológico para mejorar la capacidad de absorción de nutrientes y potencializar el crecimiento en las plantas, así como la detección rápida de enfermedades en los cultivos (**Lira et al., 2018**).

En el área agrícola se ha iniciado la comercialización de fertilizantes fabricados con nanotecnología (Kin 32, Triple 20-n, Micro-n, Magno-n) entre otros insumos, pero sus efectos en germinación y el crecimiento de plantas deben evaluarse antes de promover su uso comercial (**Solanki et al., 2015**). Además, la NT aporta a la agricultura a través de la producción de agroproductos, como nanofertilizantes, nanopesticidas, nanoherbicidas y

nanocensores, que potencialmente incrementan el rendimiento ayudando a reducir el impacto ambiental (Lira *et al.*, 2018). Las nanopartículas (NPs) son partículas más pequeñas que 100 nanómetros (Márquez *et al.*, 2021). Un nanómetro es la longitud donde los dispositivos artificiales más pequeños se encuentran con los átomos y moléculas del mundo natural (López *et al.*, 2016). Las NPs son entidades generalmente de forma esférica (Díaz, 2012).

#### 4.8 Nanopartículas en la germinación

Las NPs parecen causar efectos significativos en la germinación bajo condiciones controladas en cajas de Petri, por ejemplo, en semillas de alfalfa (*Medicago sativa*), zanahoria (*Daucus carota*) y brócoli (*Brassica oleracea var. italica*), incubadas por 24 días con diferentes concentraciones de NPsZnO (0, 50, 500 y 1000 ppm) a  $28 \pm 5^\circ\text{C}$ , se obtuvo un mayor porcentaje de germinación para la alfalfa (*Medicago sativa*) con una concentración de 500 ppm (96 %), comparado con su control (92 %), misma tendencia se observó con el brócoli (*Brassica oleracea var. Itálica*) (Amezquita *et al.*, 2018).

En otro estudio realizado con semillas de tomate y de chile ancho, con aplicaciones de NPsCuO y sulfato de cobre, a concentraciones de 0.5,1.0, 5.0,10.0, 50.0 ppm, y con plantas de tomate y pimiento a dosis de 25 y 50 ppm (Arredondo, 2016), observó que las semillas de tomate y de chile ancho presentaron respuestas positivas en las variables relacionadas con el vigor (%), longitud de radícula (cm) y longitud de plúmula (cm), con la aplicación de NPsCu en comparación al testigo. En plantas, se observó un efecto promotor en tomate, en comparación con el control.

En semillas de maíz (*Zea mays L.*), se encontró que la aplicación de NPsAg, promovió el crecimiento y desarrollo de las plántulas, llegando a mejorar significativamente algunas variables agronómicas como la longitud de la raíz, la longitud de plúmula y el peso seco, concluyendo que las semillas tratadas con AgNPs mostraron un mayor vigor en comparación con aquellas que no fueron tratadas (Estrada y Méndez, 2016).

Al analizar la respuesta fisiológica y bioquímica inducidas por NPsZnO en semillas de chile habanero (*Capsicum chinense Jac*), todos los tratamientos tuvieron un efecto promotor en la germinación, así como en el vigor de las semillas y el crecimiento de las plántulas, de manera

que estos, tienen un gran potencial para mejorar la agricultura como nanofertilizantes. El aumento de NPsZnO en un rango de 0 a 300 mg/L, mejoró el desarrollo de plúmula y radícula, mientras que a 400 y 500 mg/L, presentó una disminución en ambos tejidos (García, 2019).

Vega *et al.* (2020) reportan que las NPSHA no afectan la germinación en semillas de frijol (*Phaseolus vulgaris L.*), sin embargo, si modifican el crecimiento radicular, disminuyendo la longitud en un 23.7 % y 48 %, al incrementar la dosis de 250 a 1000 mmoles P/L, con respecto al testigo.

De acuerdo con Jhansi *et al.* (2017), las NPMgO menores de 15 nm, penetran en las semillas de cacahuate, alteran la germinación y el mecanismo de la tasa de crecimiento, y promueven parámetros de germinación y crecimiento.

Ramírez *et al.* (2021) indican que la germinación de semilla de triticale y el crecimiento radicular no presentaron efectos a dosis crecientes de NPs CS (quitosán): 0, 0.1, 0.2, 0.4 y 0.8 mg ml<sup>-1</sup>. A la concentración de 0.1 mg ml<sup>-1</sup> aumentó el peso fresco del brote hasta 83.3%.

Acharya *et al.* (2020) demostraron que el cebado de semillas con AgNPs puede mejorar la germinación, el crecimiento y el rendimiento de las semillas, manteniendo la calidad del fruto de sandía (*Citrullus lanatus*).

Vijai *et al.* (2020) usaron NPsMgO como agentes de nanocebado para mejorar la germinación de semillas de gramo verde (*V. radiata*), semillas nanocebadas con 100 mg/L presentaron germinación y vigor de plántula significativamente mejores al método de hidrocebado convencional (Testigo).

En otro estudio (Cai *et al.*, 2018), las NPsMgO no tuvieron efectos significativos en la tasa de germinación en la plántula de tabaco (*Nicotiana tabacum L.*), no hubo un aumento prominente en el porcentaje de germinación. Cuando las plantas fueron expuestas a 250 µg/ml de NPsMgO, no se exhibió efecto toxicológico a esta concentración, sin embargo, las concentraciones que oscilaron entre 0 µg/ml y 250 µg/ml presentaron un aumento notable en el contenido de clorofila a y b, de 0.21 y 0.12 µg/g a 1.21 y 0.67 µg/g, respectivamente, después de 30 días de tratamiento.

**Rani et al. (2020)** observaron un incremento significativo en la tasa de germinación en semillas tratadas con NPsMgO y NPsZnO, en relación con las semillas tratadas con agua (control), así como crecimiento de plántulas de *Vigna radiata* (frijol mungo) y *Cajanus cajan* (gramo rojo).

**Hussain et al. (2019)** reportaron un aumento en el crecimiento de plantas de rábano (*Raphanus sativus* L.) bajo estrés por plomo, sometidas a NPsMgO combinada con Thidiazuron, donde mostró un aumento de seis veces en acumulación de Pb ( $1721.73 \pm 17.4$   $\mu\text{g/g}$  de biomasa seca), en comparación con el control ( $274.29 \pm 4.23$   $\mu\text{g/g}$ ).

**Kanjana (2020)** encontró que 60 ppm de NPsMgO era la dosis óptima para mejorar el valor de clorofila (SPAD), el peso de la cápsula y el rendimiento del algodón en rama.

## V. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Localización

El trabajo se llevó a cabo en el Laboratorio de Fisiología de Semillas del Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas (CCDTS), de la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro” ubicada en Saltillo, Coahuila.

### 5.2 Bioensayo

Para determinar el efecto de las nanopartículas de magnesio (NPsMgO) en la germinación, vigor y crecimiento de planta, se utilizaron semillas de maíz híbrido (*Zea mays L.*), se estableció un bioensayo que incluyó un tratamiento control (agua destilada) y siete diferentes dosis de NPsMgO (Cuadro 1), con cuatro repeticiones de 25 semillas cada una.

### 5.3 Preparación de suspensiones de NPsMgO

Las NPsMg utilizadas presentaban un tamaño de 20 nm. Se pesaron los gramos de NPsMgO correspondientes a la concentración de cada tratamiento y se mezclaron con 50 ml de agua destilada. Antes de la aplicación se agitó de manera manual y después durante 10 minutos en un sonicador, repitiendo 4 veces, con un tiempo intermedio de reposo de 2 minutos.

### 5.4 Imbibición de semillas con NPsMgO

Se prepararon ocho cajas de Petri con 100 semillas cada una, posteriormente con una probeta se les agregó 30 ml de suspensión de NPsMgO correspondiente a cada tratamiento (Cuadro 1), enseguida se pusieron en la cámara de germinación durante 24 h.

**Cuadro 1.** Tratamientos aplicados a semillas de maíz.

<b>Tratamiento</b>	<b>NPsMgO (ppm)</b>
T <sub>0</sub>	0
T <sub>1</sub>	50
T <sub>2</sub>	100
T <sub>3</sub>	200
T <sub>4</sub>	300
T <sub>5</sub>	400
T <sub>6</sub>	500
T <sub>7</sub>	1000

NPsMgO= Nanopartículas de Óxido de Magnesio; ppm= Partes por millón.

### **5.5 Siembra entre papel**

Este proceso se realizó 24 h después de la imbibición en los diferentes tratamientos, se utilizaron hojas de papel Anchor, humedeciéndolas con agua destilada para después distribuir 25 semillas de manera uniforme y horizontal con el embrión hacia abajo, manteniendo un margen de 5 cm. Posteriormente se cubrió con otra hoja del mismo material, humedeciendo nuevamente, procediendo a doblar en forma de taco, obteniendo así por cada tratamiento cuatro repeticiones que se etiquetaron y colocaron por tratamiento en bolsas de polietileno, y estas en recipientes, los cuales se llevaron a la incubadora de germinación, a una temperatura de 25 °C y 24 h oscuridad.

### **5.6 Determinación de variables**

La evaluación de variables se dio en varias etapas, realizando el primer conteo de plántulas normales a los cuatro días después de la siembra (variable vigor de germinación), enseguida se llevaron a la cámara de germinación con un fotoperiodo de 16/8 h (luz/oscuridad), tres días después se procedió a determinar clorofila (SPAD), y al día siguiente (octavo) se realizó

el segundo conteo, así como la medición de la longitud de la plúmula y de la raíz y la obtención de peso seco de plántula (plúmula y radícula).

### **5.6.1 Primer conteo de plántulas normales**

Se realizó cuatro días después de la siembra, representando el porcentaje de vigor de germinación, para lo cual se contaron las plántulas normales vigorosas, esto es plántulas sin ninguna malformación visible, que poseían todas sus partes bien desarrolladas (radícula y plúmula).

**5.6.2 Contenido clorofila o verdor (CLOR):** Se determinó al séptimo día después de la siembra, con el SPAD 502 Plus, que cuantifica instantáneamente el nivel de clorofila, y se correlaciona con los niveles de nitrógeno.

### **5.6.3 Segundo conteo de plántulas**

**Plántulas de alto vigor (PAV):** plántulas que presentaron un desarrollo mayor en todas sus partes (radícula y plúmula) a diferencia de las demás, de color verde oscuro y con una raíz principal fuerte, con numerosas raíces laterales, representado en porcentaje.

**Plántulas de bajo vigor (PBV):** plántulas que presentaron un desarrollo inferior en sus partes (radícula y plúmula) a diferencia de las demás plántulas, representados en porcentaje.

**Plántulas anormales (PA):** son aquellas que no mostraron el potencial para desarrollarse de forma continua y satisfactoria en plantas, al ser cultivadas en suelos de buena calidad y bajo condiciones favorables de humedad, temperatura, y luz. Expresado en porcentaje.

**Semilla sin germinar (SSG):** se contaron las semillas que presentaron incapacidad para germinar, representado en porcentaje.

**Longitud de plúmula (LP):** con ayuda de una regla elaborada con papel milimétrico se midió la longitud de la plúmula en cada plántula normal, los valores se expresaron en centímetros.

**Longitud de radícula (LR):** con ayuda de una regla de papel milimétrico se midió la longitud de la radícula en cada plántula normal, los valores se expresaron en centímetros.

**Peso seco:** Estos valores se obtuvieron después de haber evaluado todas las variables anteriores, para cual las plántulas normales de cada repetición y tratamiento se separaron en plúmula y en radícula, luego se colocaron dentro de bolsas de papel estraza (por repetición), las cuales se llevaron a la estufa de secado a una temperatura de 72 °C por 24 h, para proceder a medir las variables:

**Peso seco de plúmula (PSP):** En una báscula analítica se obtuvo el peso de cada repetición por tratamiento, los valores se expresaron en mg/plántula.

**Peso seco de radícula (PSR):** Se determinó en una báscula analítica, por repetición y tratamiento, los valores se expresaron en mg/plántula.

**Índice LP/LR:** Se obtuvo el cociente al dividir la longitud de la plúmula (cm) entre la longitud de la radícula (cm), para identificar cambios en el crecimiento de las plántulas como respuesta a la imbibición de semillas en suspensiones a diferentes concentraciones de NPsMgO.

### **5.6.3 Análisis estadístico**

El experimento se estableció en un diseño completamente al azar, con los datos se realizó un análisis de varianza y la comparación de medias usando la Prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ), con el paquete estadístico SAS (2004).

## VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los análisis de varianza realizados con los datos obtenidos en el bioensayo se presentan en los Cuadros 2 y 3. Se observaron diferencias significativas ( $P \leq 0.01$ ) para la fuente de variación tratamientos con NPsMgO, para las variables porcentaje de plántulas de bajo vigor, semillas sin germinar, peso seco de plúmula y de radícula, longitud de plúmula y de radícula, longitud de plúmula entre longitud de radícula, y contenido de clorofila.

Para las variables porcentaje de germinación y plántulas de alto vigor, se obtuvieron diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ).

Estos resultados indican que hubo una respuesta contrastante a la imbibición con suspensiones de NPsMgO. Trabajos similares han mostrado efectos significativos (**Rani *et al.*, 2020**) en las variables tasa de germinación y crecimiento de plántulas, al tratar semillas con NPsMgO y NPsZnO, en *Vigna radiata* (frijol mungo) y *Cajanus cajan* (gramo rojo).

Al efectuar la comparación de medias por concentración (Cuadro 4 y 5, Anexo 1 y 2), se observó un vigor de germinación estadísticamente igual como respuesta a la aplicación de los diferentes tratamientos. Con relación al porcentaje de germinación se presentó una reducción de 10 % al tratar las semillas con 1000 ppm, esto es, las NPsMgO ocasionaron un efecto negativo que redujo la capacidad germinativa de las semillas. Por otra parte, al evaluar las variables plántulas de alto vigor y de bajo vigor, se observó un incremento de plántulas de alto vigor con 400 ppm, que obtuvo 89 % con respecto al testigo que presentó 70 %. Sin embargo, el tratamiento con 400 ppm resultó estadísticamente igual a los tratamientos con 50, 200 y 300 ppm (Anexo 3). En contraste, el porcentaje de plántulas de bajo vigor se redujo a 8 %, al tratar semillas con 400 ppm de NPsMgO (Anexo 4). Resultados similares describieron **Kornarzyńsk *et al.* (2020)**, con 0, 50 y 500 ppm de Fe-NP, ya que no observaron efecto significativo sobre la tasa de germinación de semillas y el vigor.

**Cuadro 2.** Cuadrados medios del análisis de varianza para variables evaluadas en bioensayo para determinar el efecto de las NPsMgO en la germinación y acumulación de materia seca en maíz.

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>VIG</b> (%)	<b>GER</b> (%)	<b>PAV</b> (%)	<b>PBV</b> (%)	<b>PA</b> (%)	<b>SSG</b> (%)	<b>PSP</b> (mg/P)	<b>PSR</b> (mg/R)
<b>NPsMgO</b>	7	107.35NS	57.64*	224.00*	171.42 **	17.14NS	44.57 **	66.65 **	46.36 **
<b>Error</b>	24	51.16	21.83	72.00	48.66	14.66	9.33	10.94	6.04
<b>CV %)</b>		7.91	4.96	10.87	43.60	153.18	87.28	8.78	10.94

F.V.= Fuente de Variación; G.L.= Grados de libertad; \*\* = Significativo ( $P \leq 0.01$ ); \* = Significativo ( $P \leq 0.05$ ); NS= No significativo; VIG= Vigor de germinación; GER= Germinación; PAV= Plántulas de alto vigor; PBA= Plántulas de bajo vigor; PA= Plántulas anormales; SSG= Semillas sin germinar; PSP= Peso seco de plúmula; PSR= Peso seco de radícula; NPsMgO= Nanopartículas de Óxido de Magnesio; CV= Coeficiente de variación.

**Cuadro 3.** Cuadrados medios del análisis de varianza para variables evaluadas en bioensayo para determinar el efecto de las NPsMgO en el desarrollo de plúmula y radícula y en el contenido de clorofila en maíz.

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>LP (cm)</b>	<b>LR (cm)</b>	<b>LP/LR</b>	<b>FV</b>	<b>G.L.</b>	<b>CLOR (SPAD)</b>
<b>NPsMgO</b>	7	65.78 **	659.77 **	<b>0.0595**</b>	<b>NPsMgO</b>	7	123.26 **
<b>Error</b>	690	9.97	11.73	<b>0.0079</b>	<b>Error</b>	152	18.97
<b>CV (%)</b>		21.45	16.52	<b>14.62</b>	<b>CV.</b>		16.25

F.V. = Fuente de Variación; G.L. = Grados de libertad; \*\* = Significativo ( $P \leq 0.01$ ); \* = Significativo ( $P \leq 0.05$ ); LP= Longitud de Plúmula; LR= Longitud de radícula; CLOR= Contenido de clorofila; NPsMgO = Nanopartículas de Óxido de Magnesio; CV= Coeficiente de variación.

de plántulas, y en general observaron una disminución en los parámetros de germinación.

Para la variable porcentaje de plántulas anormales, todos los tratamientos resultaron estadísticamente iguales, en un rango de 0 % con 50 ppm a 6 % con 500 ppm. También se observó un incremento de semillas sin germinar al aumentar la concentración en los tratamientos con NPsMgO, lo cual indica un grado ligero de toxicidad que anula alguna actividad enzimática dentro de la semilla.

La variable peso seco de plúmula también se vio afectada al incrementar las concentraciones de NPsMgO, presentando mayor acumulación de materia seca el testigo con 43.251 mg/plúmula, con respecto a 1000 ppm que obtuvo 34.397 mg/plúmula, esto es una reducción de 8.854 mg/plúmula. Para la variable peso seco de radícula se observó una respuesta muy similar, para el testigo y 50 ppm se obtuvieron 25.639 y 27.013 mg/radícula, respectivamente. Esto indica que no hubo efecto promotor en el desarrollo de biomasa.

La variable longitud de plúmula también se vio afectada al incrementar las concentraciones de NPsMgO, presentando reducción en el desarrollo en dosis que van de 50 (15.883 cm), 500 (14.767 cm) a 1000 ppm (13.061 cm), presentando una reducción de 2.822 cm. Resultados similares se observaron para la variable longitud de radícula, donde con 50 y 200 ppm se obtuvo 23.392 y 16.063 cm, respectivamente. Esto indica que se presenta una ligera inhibición del desarrollo vegetativo.

Para la variable LP/LR se observaron valores muy similares, excepto para los tratamientos con 100 y 200 ppm que obtuvieron 0.850 y 0.891 respectivamente, indicando que en estos dos tratamientos se redujo el crecimiento de la radícula al aplicar NPsMgO durante la imbibición.

La variable contenido de clorofila se vio afectada al incrementar las dosis de NPsMgO, presentando mayor acumulación el testigo con 29.790 SPAD, con respecto a 1000 ppm con 28.400 SPAD.

**Cai et al. (2018)** obtuvieron resultados que concuerdan con los obtenidos en este trabajo, ya que al imbibir con NPsMgO no presentaron efectos significativos en la tasa de germinación en la plántula de tabaco (*Nicotiana tabacum* L.), esto es, no hubo un aumento prominente en la germinación cuando las plantas fueron expuestas a 250 µg/ml de NPsMgO. Sin embargo,

**Sharma et al. (2021)** observaron que las semillas tratadas con ZnONPs a una dosis de 20 mg/l mostraron más de 50 % de estimulación en peso seco, absorción relativa de agua de las semillas, y longitud de la radícula de la plántula, en comparación con otras soluciones de cebado y control.

**Alkhatib et al. (2021)** observaron que la longitud de las radículas y la tasa de germinación de las semillas se vieron significativamente afectadas (positiva o negativamente) en todas las semillas tratadas con NPsFe, en comparación con las semillas de control.

**Shinde et al. (2020)** indicaron que al tratar semillas con nanopartículas de hidróxido de magnesio  $Mg(OH)_2$ NPs a 500 ppm se incrementó la germinación a 100%. Las plántulas cultivadas *in vitro* con  $Mg(OH)_2$ NPs presentaron mayor longitud de tallo ( $11.96 \pm 0.4$  cm) y de raíz ( $3.92 \pm 0.4$  cm), con respecto al testigo. Para los estudios *in vivo*, se incrementó la longitud de del tallo ( $44.2 \pm 1.6$  cm) y de la raíz ( $29.2 \pm 1.3$  cm), sin embargo, plantas cultivadas con 500 ppm Mg a granel, presentaron menor longitud de tallo.

Los coeficientes de correlaciones de Pearson (Cuadro 6), indican relación positiva significativa entre la variable porcentaje de vigor de germinación y porcentaje de germinación ( $r = 0.7900^{**}$ ) y plántulas de alto vigor ( $r = 0.5355^{**}$ ), indicando que la capacidad germinativa depende en gran medida del vigor que posee la semilla al inicio del proceso.

La variable porcentaje de germinación presentó una correlación positiva significativa con las variables plántulas de alto vigor ( $r = 0.4987^{**}$ ), longitud de plúmula ( $r = 0.4487^{**}$ ) y longitud de radícula ( $r = 0.3677^*$ ), también se presentó una correlación negativa significativa entre la variable plántulas anormales ( $r = -0.6438^{**}$ ), indicando que la capacidad de germinación de las semillas, se refleja en el desarrollo vegetativo, haciendo también referencia que al incrementar esta variable, se reduce el porcentaje de plántulas anormales.

**Cuadro 4.** Comparación de medias de variables evaluadas en bioensayo para determinar el efecto de las NPsMgO, aplicadas a semillas de maíz durante la imbibición.

<b>NPsMgO (ppm)</b>	<b>VIG (%)</b>	<b>GER (%)</b>	<b>PAV (%)</b>	<b>PBV (%)</b>	<b>PA (%)</b>	<b>SSG (%)</b>
0	91 a	99 a	70 c	28 a	1 a	1 b
50	95 a	96 ab	79 abc	17 ab	4 a	0 b
100	79 a	89 a	70 c	19 ab	1 a	10 a
200	92 a	94 ab	75 abc	19 ab	3 a	3 ab
300	93 a	97 a	87 ab	10 b	1 a	2 a
400	95 a	97 a	89 a	8 b	0 a	3 ab
500	95 a	92 ab	82 abc	10 b	6 a	2 b
1000	90 a	89 ab	72 c	17 ab	4 a	7 ab
<b>X</b>	90	94	78	16	2	3
<b>Tukey</b>	16.7	10.9	19.8	16.3	8.9	7.1

Valores con la misma letra en las columnas son estadísticamente iguales (Tukey,  $a= P \leq 0.05$ ); NPsMgO= Nanopartículas de Óxido de Magnesio; VIG= Vigor; GER= Germinación; PAV= Plántulas de alto vigor; PBA= Plántulas de bajo vigor; PA= Plántulas anormales; SSG= Semillas sin germinar; ppm= partes por millón %= porcentaje; X = Media.

**Cuadro 5.** Comparación de medias de variables evaluadas en bioensayo para determinar el efecto de las NPsMgO, aplicadas a semillas de maíz durante la imbibición.

<b>NPsMgO (ppm)</b>	<b>PSP (mg/P)</b>	<b>PSR (mg/P)</b>	<b>LP (cm)</b>	<b>LR (cm)</b>	<b>CLOR (SPAD)</b>	<b>LP/LR</b>
0	43.251 a	25.639 a	15.487 ab	22.650 a	29.790 a	0.684 b
50	35.236 bc	27.013 a	15.883 a	23.392 a	29.515 a	0.678 b
100	42.440 ab	19.610 bc	14.340 bc	16.872 c	24.660 cd	0.850 a
200	40.509 abc	16.578 c	14.320 bc	16.063 c	25.545 bcd	0.891 a
300	32.756 c	22.390 ab	15.242 ab	22.181 a	28.395 abc	0.687 b
400	34.056 c	22.223abc	14.573 ab	22.002 a	24.140 d	0.662 b
500	38.638 abc	24.952 ab	14.767 ab	22.227 a	23.885 d	0.664 b
1000	34.397 c	21.312 abc	13.061 c	19.883 b	28.400 abc	0.656 b
<b>Media</b>	37.66	22.460	14.72	20.73	26.791	0.751
<b>Tukey</b>	7.7	5.7	1.4	1.5	19.8	0.2

Valores con la misma letra en las columnas son estadísticamente iguales (Tukey,  $a= P \leq 0.05$ ); NPsMgO= Nanopartículas de Óxido de Magnesio; PSP= Peso seco de plúmula; PSR= Peso seco de radícula; LP= Longitud de plúmula; LR= Longitud de radícula; CLOR= Clorofila; IR/P= Índice relativo por plántula; ppm= partes por millón; mg/P = Miligramos por plántula; cm= centímetros; X = Media.

Los coeficientes de correlaciones de Pearson indican una correlación negativa significativa entre las variables porcentaje de plantas de alto vigor y porcentaje de plantas de bajo vigor ( $r = -0.8533^{**}$ ), lo cual es completamente lógico, ya que, al incrementar el número de plántulas vigorosas, se reduce el de las menos vigorosas.

Se presentó también una correlación negativa significativa entre las variables peso seco de plúmula y longitud de radícula ( $r = -0.3828^*$ ) y la variable índice LP/LR ( $r = -0.65348^{**}$ ), indicando que al existir mayor biomasa en plúmula se disminuye en la radícula.

Para la variable peso seco de radícula se presentó una correlación positiva significativa con las variables longitud de radícula ( $r = 0.7026^{**}$ ) e índice LP/LR ( $r = 0.7546^{**}$ ), donde indica que el incremento de biomasa en la radícula se manifiesta mayor desarrollo de esta.

Se observó una correlación positiva significativa entre las variables longitud de plúmula y longitud de radícula ( $r = 0.4501^{**}$ ) y el índice de clorofila ( $r = 0.47589^{**}$ ), confirmando la función de la clorofila en la acumulación de materia seca, a través de la fotosíntesis.

Los coeficientes de correlaciones de Pearson también indicaron relación positiva significativa entre las variables longitud de radícula y el índice LP/LR ( $r = 0.7437^{**}$ ).

En general, en este trabajo se observó que los tratamientos con altas concentraciones de NPsMgO, causaron una ligera reducción en la respuesta de las variables importantes para la calidad de las semillas y de las plántulas.

**Cuadro 6.** Coeficientes de correlación Pearson de las variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz (*Zea mays L.*), tratadas con NPsMgO.

	<b>GER</b> (%)	<b>PAV</b> (%)	<b>PBV</b> (%)	<b>PA</b> (%)	<b>SSG</b> (%)	<b>PSP</b> (mg/P)	<b>PSR</b> (mg/P)	<b>LP</b> (cm)	<b>LR</b> (cm)	<b>CLR</b> (SPAD)	<b>LP/LR</b>
<b>VIG</b>	0.7900**	0.5355**	-0.1478NS	-0.4283*	-0.6155**	-0.3965*	-0.1000NS	0.3089NS	0.3225NS	0.3014NS	0.1765NS
<b>GER</b>		0.4987**	0.0215NS	-0.6438**	-0.6779**	-0.1580NS	-0.0105NS	0.4487**	0.3677*	0.1830NS	0.1137NS
<b>PAV</b>			-0.8533**	-0.41049*	-0.3009NS	-0.4256*	0.0389NS	0.1931NS	0.3227NS	-0.0847NS	0.2823NS
<b>PBV</b>				0.0908NS	-0.0710NS	0.3770*	-0.0559NS	0.0225NS	-0.1686NS	0.1780NS	-0.2510NS
<b>PA</b>					-0.1113NS	0.1099NS	0.3127NS	-0.1717NS	0.0054NS	0.0004NS	0.1214NS
<b>SSG</b>						0.1599NS	-0.2724NS	-0.3652*	-0.4508**	-0.1644NS	-0.2865NS
<b>PSP</b>							-0.0285NS	-0.0189NS	-0.3828*	-0.0030NS	-0.65348**
<b>PSR</b>								0.2913NS	0.7026**	0.2320NS	0.7546**
<b>LP</b>									0.4501**	0.47589**	0.2871NS
<b>LR</b>										0.2964NS	0.7437**
<b>CLR</b>											0.1714NS

VIG= Vigor; GER= Germinación; PAV= Plántulas de alto vigor; PBA= Plántulas de bajo vigor; PA= Plántulas anormales; SSG= Semillas sin germinar; PSP= Peso seco de plúmula; PSR= Peso seco de radícula; LP= Longitud de Plúmula; LR= Longitud de radícula; CLR= Contenido de clorofila; IND= Independiente.

## VII. CONCLUSIONES

La aplicación de NPsMgO durante la imbibición de semillas de maíz, no mejoró significativamente la respuesta de las variables VIG, GER, PBV, PA, SSG, PSP, PSR, LP, LR y CLOR.

Las respuestas observadas indican que al incrementar las dosis de NPsMgO, se disminuyó ligeramente el vigor de germinación, el crecimiento de plántulas y el contenido de clorofila.

La variable porcentaje de plántulas de alto vigor, presentó diferencias significativas al tratar semillas con 400 ppm de NPsMgO que obtuvo 89 %, superando al testigo que presentó 70 %.

Al imbibir semillas en suspensión de NPsMgO a 50 ppm, se incrementó ligeramente el peso seco de radícula, la longitud de plúmula y de radícula, y se redujo a cero el porcentaje de semillas sin germinar.

Tratar las semillas con 100 y 200 ppm de NPsMgO incrementó significativamente el índice LP/LR, indicando un menor desarrollo de la radícula con respecto al resto de los tratamientos.

Imbibir semillas en suspensiones con NPsMgO originó coeficientes de correlación significativos entre peso seco de radícula y longitud de radícula, así como entre longitud de plúmula y contenido de clorofila.

Toxicidad por magnesio posiblemente no sea la causa de los resultados obtenidos, sino más bien, es un elemento que compite con el calcio y el potasio, reflejándose en reducción del desarrollo de las plántulas, principalmente las hojas. La falta de potasio limita de la circulación de agua y de nutrientes a través de la planta.

## **VIII. RECOMENDACIONES**

Al parecer 50 ppm resultó ser el mejor tratamiento, por lo que para próximos trabajos con NPsMgO, se recomienda aplicar en un rango de 0 a 50 ppm.

Actualmente, hay escasa información sobre el efecto de las NPsMgO en la germinación y en el crecimiento de plántula, por lo que se recomienda realizar más investigación sobre el tema.

## VIII. BIBLIOGRAFÍA

**Acharya, P., Jayaprakasha, G. K., Crosby, K., Jifon, J. L. and Patil, B. S.** 2020. Nanoparticle-mediated seed priming improves germination, growth, yield, and quality of watermelons (*Citrullus lanatus*) at multi-locations in Texas. *Scientific Reports*. 10(1):1-16.

**Alkhatib, R., Alkhatib, B., and Abdo, N.** 2021. Effect of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles on seed germination in tobacco. *Environmental Science and Pollution Research*. 28(38). pp. 53568 – 53577.

**Amezquita, J. M., Salinas, E. M., González, P. V., Valle, J. D., y Vázquez, E.** 2018. ¿Las nanopartículas de zinc alteran el desarrollo de brócoli, alfalfa y zanahoria? *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*. 9 (21): pp. 149 – 159.

**Arredondo, J. A.** 2016. Nanopartículas de cobre como promotoras de germinación de semillas y crecimiento de plantas de *Capsicum annuum* y *Lycopersicon esculentum*. Tesis de Licenciatura. Ingeniero Agrónomo en Producción. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila. 29 p.

**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.*). *Molecules*, 23(12). p. 3375.

**Cakmak, I., y Yazici, A. M.** 2010. El magnesio, un nutriente olvidado que puede salvar tu cultivo. INTAGRI S.C. Disponible en: <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/magnesio-nutriente-olvidado-salvar-cultivo>. Fecha de consulta. 03-02-2022.

**Chen, J.** 2021. La función del magnesio en el cultivo de plantas. PRO-MIX. PRO MIX. Disponible en: <https://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/la-funcion-del-magnesio-en-el-cultivo-de-plantas/>. Fecha de Consulta: 01-02-2022

**Díaz Del Castillo, F.** 2012. Introducción a los nanomateriales 1<sup>a</sup>. ed., Vol. 20. Lecturas de ingeniería 20. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Universidad Autónoma de México. México. P. 4.

- Estrada, J.**, y Méndez, A. 2016. Efecto de nanopartículas de plata (AgNPs) sobre la calidad fisiológica de la semilla de maíz (*Zea mays L.*). Revista Tlamati Sabiduría, 7(3). pp. 9–12.
- García L., J. I.** 2019. Respuestas fisiológicas y bioquímicas inducidas por nanopartículas de ZnO en semillas y plantas de chile habanero (*Capsicum chinense Jacq.*). Tesis de Doctorado. UANL. General Escobedo, N.L. pp. 81-86.
- Grimme, H.**, Von Braunschweig, L. C., and Nemeth, K. 1974. Potassium, calcium, and magnesium interactions as related to cation uptake and yield. Landw. Forsch. Sonderh. pp. 93-100.
- Grimme, H.** 1983. Aluminum induced magnesium deficiency in oats. Z. Pflanzenemahr. Bodenk. 146. pp. 666-676.
- Hussain, F.**, Hadi, F., and Akbar, F. 2019. Magnesium oxide nanoparticles and thidiazuron enhance lead phytoaccumulation and antioxidative response in *Raphanus sativus L.* Environmental Science and Pollution Research, 26(29). pp. 30333–30347.
- Jhansi, K.**, Jayarambabu, N., Reddy, K., Reddy, N., Suvarna, R., Rao, K., Kumar, V., and Rajendar, V. 2017. Biosynthesis of MgO nanoparticles using mushroom extract: effect on peanut (*Arachis hypogaea L.*) seed germination. 3 Biotech, 7(4), pp. 1–11.
- Kanjana, D.** 2020. Foliar application of magnesium oxide nanoparticles on nutrient element concentrations, growth, physiological, and yield parameters of cotton. Journal of Plant Nutrition, 43(20). pp. 3035 – 3049.
- Kornarzyński, K.**, Sujak, A., Czernel, G., and Wiącek, D. 2020. Effect of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles on germination of seeds and concentration of elements in *Helianthus annuus L.* under constant magnetic field. Scientific Reports, 10(1) pp. 1–10.
- Lira Saldívar, R. H.**, Méndez Argüello, B., De los Santos Villareal, G., y Vera Reyes, I. 2018. Potencial de la nanotecnología en la agricultura. Acta Universitaria, 28(2), pp. 9-24.
- López De La Peña, H. Y.**, López Badillo, C. M., Muzquiz Ramos, E. M., Hernández Centeno, F., y Hernández González, M. 2016. Nanopartículas: aplicaciones actuales y futuras en la industria alimentaria. Ciencia Cierta. Vol. 48, pp. 1–9.

**Marquéz, E.,** Hernández, D., Míguez, M., Soler, F., y Pérez, M. 2021. Las nanopartículas y sus aplicaciones biomédicas. Universidad de Extremadura. España. 1ª ed., Vol. 1. p. 9.

**Mengel, K.,** and Kirkby, E. A. 2000. Principios de nutrición vegetal. 4.ª ed., Instituto Internacional del Potasio. Basilea, Suiza. p. 12.

**Moreno Reséndez, A.** 2007. Elementos nutritivos: asimilación, funciones, toxicidad e indisponibilidad en los suelos. 1.ª ed., Vol. 1.

**Pérez Leal, F.** 2017. Fisiología vegetal. 3.ª ed., Pucallpa, Perú. Universidad Nacional de Ucayali. pp. 9–11.

**Piaggese, A.,** y Sequi, P. 2004. Los microelementos en la nutrición vegetal. Instituto Experimental para la nutrición de las plantas. 1.ª ed. Italia. pp. 47-50.

**Ramírez R., S.C.,** Ortega Ortiz, H., Fortis Hernández, M., Nava Santos, J.M., Orozco

Vidal, J.A. and Preciado Rangel, P. 2021. Nanopartículas de quitosano mejoran la calidad nutracéutica de germinados de triticale. Rev. Mex. Cienc. Agríc vol.12 no.4. pp. 579-589.

**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. Vol. 13, pp. 3172-3182.

**Rani, P.,** Kaur, G., Rao, K. V., Singh, J., and Rawat, M. 2020. Impact of Green Synthesized Metal Oxide Nanoparticles on Seed Germination and Seedling Growth of *Vigna radiata* (Mung bean) and *Cajanus cajan* (Red gram). Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials, 30(10), Pp 4053–4062.

**Rodríguez, D. A.,** y Buitrago, D. M. 2019. Evaluación de los microelementos Zinc, Cobre, Magnesio y Manganeso, como enraizante en el cultivo de arroz (*Oryza Sativa* L). Variedades Fedearroz 67, Fedearroz 68 y Oryzica 1 en el municipio de Piedras: Tolima. Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD & Escuela de Ciencias Agrícolas Pecuarias y del Medio Ambiente. Colombia. 103 p.

**Schimansky, C.** 1981. The influence of certain experimental parameters on the flux characteristics of Mg-28 in the case of barley seedlings grown in hydroculture. Landwirtschaftliche Forschung. 34. pp. 154-163.

**Sharma, D., Afzal, S., and Singh, N. K.** 2021. Nanoprimering with photosynthesized zinc oxide nanoparticles for promoting germination and starch metabolism in rice seeds. *Journal of Biotechnology*. 336. pp 64–75.

**Solanki, P., A. Bhargava, H. Chipa, N. Jain, and J. Panwar.** 2015. Nano-fertilizers and their smart delivery system. In: Rai, M., C. Ribeiro, and L. Mattoso, N. Duran. *Nanotechnologies in Food and Agriculture*. Springer, Cham. pp: 81-101.

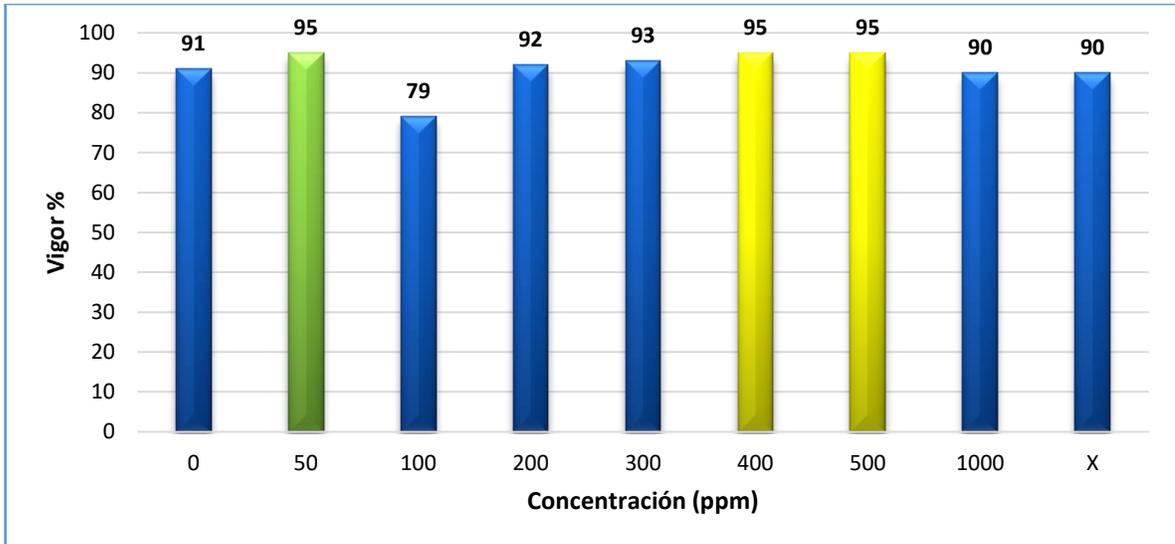
**Vega García, N. L., Peña Valdivia, C. B., González Chávez, M. C., Padilla Chacón, D., y Carrillo González, R.** 2020. Síntesis y efecto de nanopartículas de hidroxapatita en la germinación y crecimiento de frijol. *Agrociencia*. 54 (8). pp. 1009-1029.

**Vijai Anand, K., Anugraha, A. R., Kannan, M., Singaravelu, G., and Govindaraju, K.** 2020. Bio-engineered magnesium oxide nanoparticles as nano-priming agent for enhancing seed germination and seedling vigour of green gram (*Vigna radiata L.*). *Materials Letters*, p. 271.

**Vistoso Gacitúa, E., y Martínez Lagos, J.** 2020. Magnesio disponible y fertilización en suelos de la Región de Los Ríos. *Instituto de Investigaciones Agropecuarias*. 261, pp. 2–3.

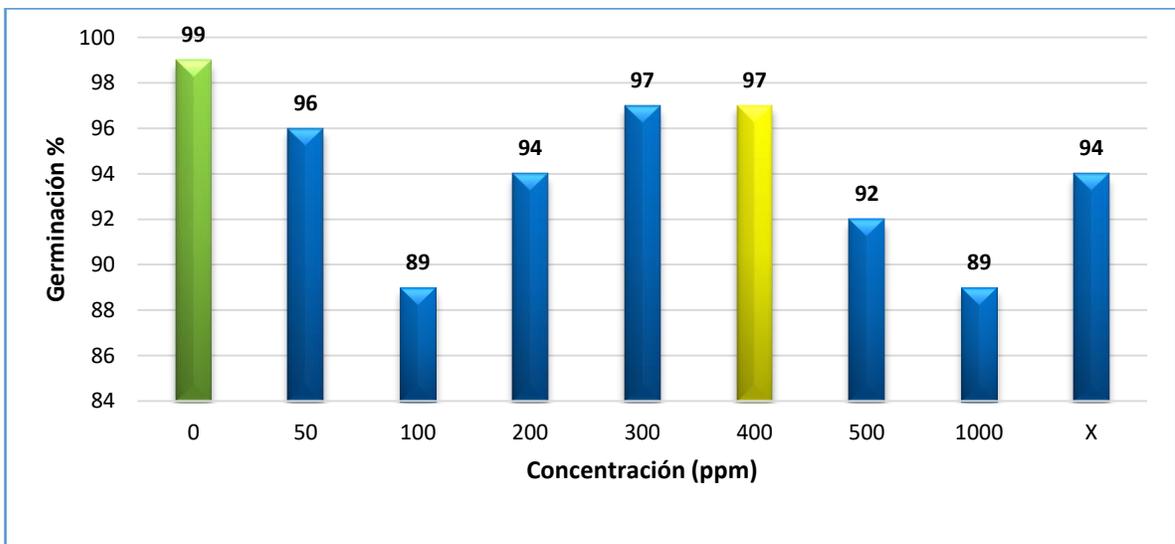
## IX. ANEXOS

**Figura 1.** Respuesta del vigor de germinación de semillas de *Zea mays* a tratamientos con diferentes concentraciones de NPsMgO.



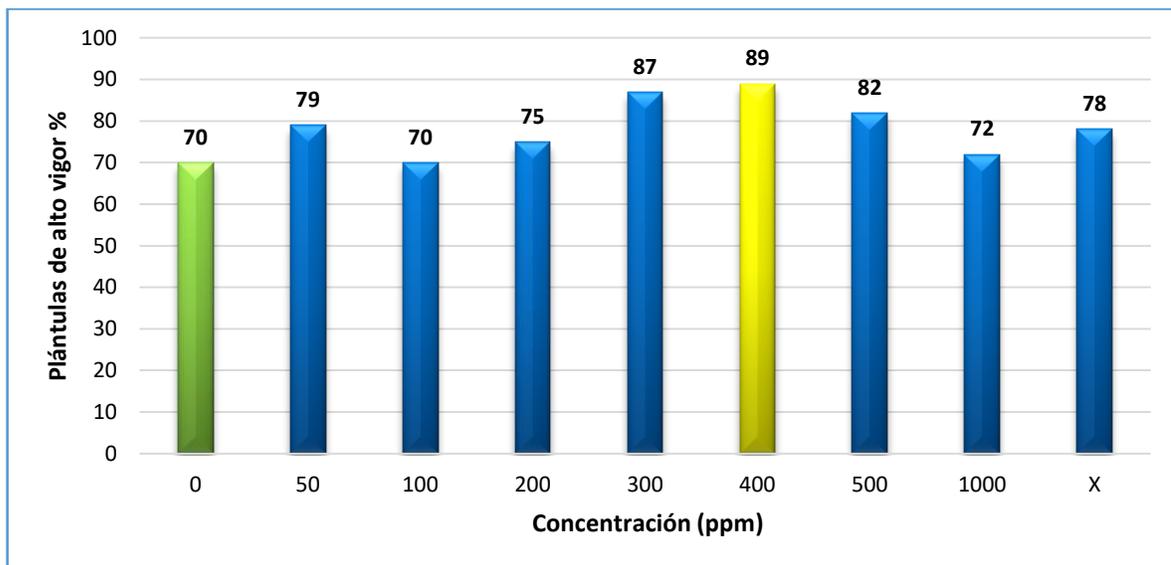
Ppm: partes por millón, %: porcentaje

**Figura 2.** Respuesta de la variable porcentaje de germinación de semillas de *Zea mays*, a diferentes concentraciones de NPsMgO.



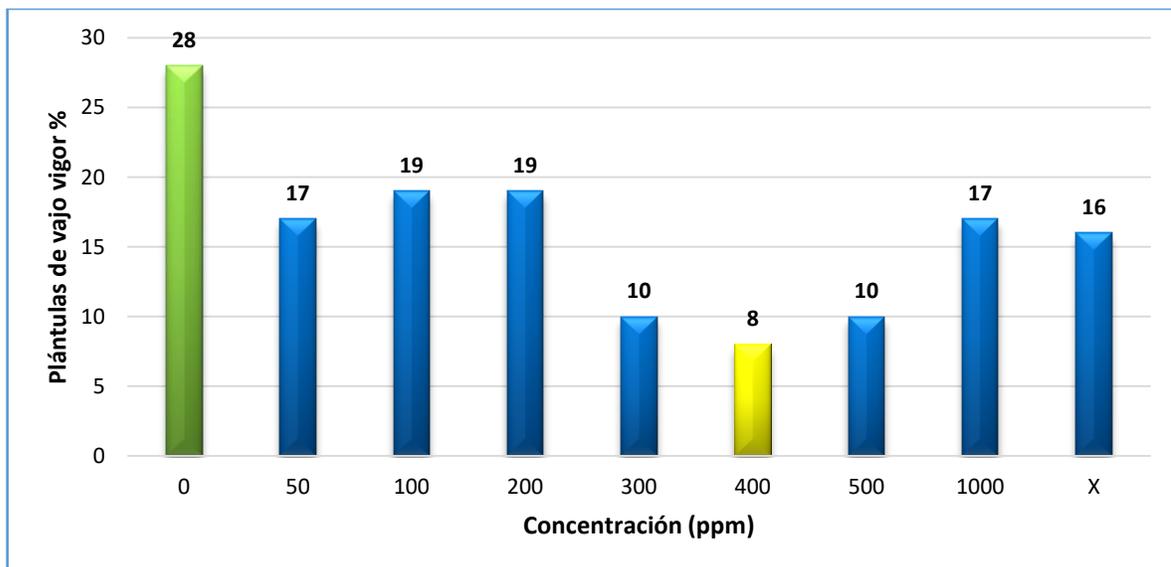
Ppm: partes por millón, %: porcentaje

**Figura 3.** Respuesta de la variable plántulas de alto vigor a diferentes concentraciones de NPsMgO.



Ppm: partes por millón, %: porcentaje

**Figura 4.** Respuesta de la variable plántulas de bajo vigor a diferentes concentraciones de NPsMgO.



Ppm: partes por millón, %: porcentaje concentración