



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN**

**EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE  
ZINC DOPADAS CON MAGNESIO SOBRE LA CALIDAD FISIOLÓGICA  
Y SANITARIA DE PLÁNTULAS DE TOMATE DE CÁSCARA  
(*Physalis ixocarpa*)**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**INGENIERO AGRÍCOLA**

P R E S E N T A

**ERICK ABRAHAM SÁNCHEZ BEJARANO**

A S E S O R E S:

DR. JESÚS ABRAHAM MÉNDEZ ALBORES

DRA. ALMA GUADALUPE VÁZQUEZ DURÁN

M. EN C. JUAN ROBERTO GUERRERO AGAMA

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2024.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTILÁN  
SECRETARIA GENERAL  
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN



PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y  
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado: Efecto de la aplicación de nanopartículas de óxido de zinc dopadas con magnesio sobre la calidad fisiológica y sanitaria de plántulas de tomate de cáscara (Physalis ixocarpa)

\_\_\_\_\_, que presenté para obtener el título/grado de: Ingeniero Agrícola, es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación/graduación.

Atentamente

Erick Abraham Sánchez Bejarano 318081702

Nombre y número de cuenta del egresado(a)



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
SECRETARÍA GENERAL  
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN



ASUNTO: VOTO APROBATORIO

DR. DAVID QUINTANAR GUERRERO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE

ATN: M. EN C. SERGIO ARTURO OJEDA PIEDRA  
Jefe del Departamento de Titulación  
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el trabajo de: **Tesis.**

**Efecto de la aplicación de nanopartículas de óxido de zinc dopadas con magnesio sobre la calidad fisiológica y sanitaria de plántulas de tomate de cáscara (Physalis ixocarpa)**

Que presenta el pasante: **Erick Abraham Sánchez Bejarano.**

Con número de cuenta: 318081702 para obtener el Título de: **Ingeniero Agrícola.**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO.**

**ATENTAMENTE**

**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 10 de octubre de 2024.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	Dra. Susana Patricia Miranda Castro	
<b>VOCAL</b>	Dr. Jesús Abraham Mendez Albores	
<b>SECRETARIO</b>	Dr. Samuel Álvarez Almazán	
<b>1er. SUPLENTE</b>	Ing. Jonathan Alfredo Fernández Mendiola	
<b>2do. SUPLENTE</b>	Ing. Octavio Chavarría Silva	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional.

SAOP/ntm\*

## AGRADECIMIENTOS

***A Dios.** Reconozco la grandeza de aquel que me guía, porque él me pone a las personas, lugares, y momentos adecuados que me hacen una persona venturosa. “Porque el que confía en Dios recibe lo que pide, encuentra lo que busca y, si llama, es atendido” (Mateo 7:8-12).*

***A mis padres.** Eric Gabino Sánchez López y Janet Yazmín Bejarano García. La gratitud que les tengo a mis mayores maestros de vida es infinita, a ustedes les debo la vida, la crianza, y la orientación. Soy bendecido por tenerlos juntos, porque me llenan de amor y me comparten a manos llenas todo lo que con esfuerzo han construido, sin detenerse ahí, me han capacitado a mi para construir lo propio, desde las bases del trabajo duro, la constancia, y el amor.*

***A mis hermanos.** Jesús Emmanuel Sánchez Bejarano y María Jazmín Sánchez Bejarano. Su hambre de superación, y capacidad de enfrentar los obstáculos es para mí una fuente de inspiración, gracias por su compañía en los momentos difíciles y por compartir en los momentos buenos, nadie nos ha visto crecer mejor que nosotros, nos criamos juntos y permaneceremos juntos a pesar de lo que Dios nos tenga preparado en lo individual.*

***A mis asesores.** Dr. Abraham Méndez Albores, Dra. Alma Vázquez Duran y M.C. Roberto Guerrero Agama. Siendo parte fundamental de este trabajo, no solo les agradezco el invaluable tiempo, consejos, y regaños que dedicaron al proyecto, si no también, la inquietud de aprender que despertaron en mí, gracias por abrirme sus puertas y avivar el interés de los futuros profesionistas.*

***A mi alma mater.** Mi rancho, mi FES Cuautitlán, porque me llena de orgullo ser UNAM, pero aún más, ser Agrícola, ser FES-C, pues aquí se desarrollan los futuros diamantes que el campo mexicano necesita, ingenieros con capacidad de innovar, transformar y crear. Infinitas gracias a todos los profesores que formaron y compartieron sus conocimientos durante mi estancia.*

***A mis redes de apoyo.** Expreso mi más profundo agradecimiento a mis amigos/maestros del laboratorio 14, especialmente a Liss, Paco, Mari, Rubén; a Isaac mi amigo más real y presente durante la carrera; a Bren, mi compañía en todo este proceso y mi ayudante por excelencia en cada revisión, gracias infinitas a todos aquellos que se involucraron y me extendieron su mano para realizar este proyecto.*

*Este trabajo de tesis fue realizado con apoyo de los Programas UNAM-PAPIIT Clave A101523 y Cátedras de Investigación Clave CI2404.*

## DEDICATORIAS

*Cada logro en mi vida será siempre gracias a Dios y puesto a su nombre, sin importar la circunstancia él nunca me ha dejado solo, y sé que seguirá presente en mis proyectos a futuro.*

*Tú has estado en todas las etapas de mi vida académica, y nunca dejare de agradecer todo lo que me enseñaste, desde lo más básico cómo leer, sumar, multiplicar; también cosas que me han hecho un adulto funcional como lavar, cocinar, hacerme valer por mí mismo, igualmente me enseñaste cosas más profundas como el trato con las personas y a siempre dar lo mejor de mí. Siempre he contado con tu apoyo, y aunque quisiera darte mucho más, hoy, mi única forma de pagarte tanto, es dedicándote un logro más, Mamá.*

*Dicen que las piedras en el camino son pasos hacia tu destino; y yo admiro tanto que atravesaste montañas de piedras y aun así no paraste de caminar. Papá, a pesar de tantas dificultades que has tenido en la vida, siempre das lo mejor de ti para mejorar; hoy tienes una familia a la que le diste el pescado que alguna vez deseaste tener, y lo más valioso, nos enseñaste a pescar. Gracias por esforzarte en hacernos personas de bien, y por inculcarnos honrar a nuestros padres, el reconocimiento es para ustedes.*

*Llegar aquí no es un mérito propio, pues mi familia ha estado detrás en todo este proceso. Mi sangre, mis apellidos, son ejemplo y testimonio de que, con la mano de Dios, se puede conseguir todo lo que uno se imagine; gracias porque me han despertado el deseo de salir adelante, llevo en mi corazón sus palabras, apoyo y compañía; sin ustedes como motivadores no lo hubiera logrado.*

*Mi estancia universitaria, me regaló momentos inolvidables con personas memorables, agradezco compartir ideales, compartir carcajadas, y compartir amistad con ustedes Isaac, Alan, Amaury, Dante, Ashe... entre otros amigos con los que genere un lazo de confianza y afecto mutuo. Sé que cuento con ustedes, así como ustedes conmigo. Además, durante la carrera también conocí a Bren, una gran compañera de anécdotas y de momentos memorables. Gracias a todos ustedes, les deseo el mejor de los éxitos.*

*Nos conocemos desde los 11 años, crecimos, y hoy cada uno toma su rumbo. Gracias, amigos, durante 12 años siempre hemos estado pendientes de nosotros, festejando los momentos buenos y acompañándonos en los tiempos difíciles. Quién diría que aquellos niños juguetones y relajientos lo podían lograr... hoy el primer graduado, pero cada uno saldrá adelante en su ámbito, de eso no tengo duda. Mickey, Mosqueda, Armendáriz, Yamal, Viveros, Fercha, Kaly y Vianey, tienen la obligación de poner la vara más alta.*

*Una mención especial a ese Abraham de 17 años, que se encaminaba a descubrir lo capaz y fuerte que es.*

## ❖ ÍNDICE GENERAL

LISTADO DE CUADROS .....	2
LISTADO DE FIGURAS .....	3
RESUMEN.....	5
1. INTRODUCCIÓN .....	7
2. OBJETIVOS.....	8
2.1. Objetivos particulares. ....	8
2.2. Hipótesis.....	8
3. MARCO TEORICO .....	8
3.1. Nanociencia y nanotecnología.....	8
3.1.1. Nanoestructuras y nanopartículas.....	9
3.1.2. Aplicación de nanopartículas en la agricultura. ....	9
3.2. Nanopartículas de óxido de zinc y magnesio como nanofertilizante.....	10
3.3. Desarrollo de plántulas de tomate de cáscara ( <i>Physalis ixocarpa</i> ). ....	12
3.3.1. Evaluación de agentes patógenos en la germinación. ....	12
3.3.2. Variables que dan calidad a la plántula.....	13
4. MATERIALES Y MÉTODOS .....	14
4.1. Descripción del área de estudio. ....	14
4.1.1. Localización geográfica. ....	14
4.1.2. Características agroclimáticas.....	15
4.2. Métodos de laboratorio.....	16
4.2.1. Síntesis y caracterización de las nanopartículas. ....	16
4.2.2. Distribución de los tratamientos.....	19
4.2.3. Acondicionamiento osmótico de las semillas de tomate. ....	19
4.3. Diseño experimental y análisis estadístico. ....	21
4.4. Labores agronómicas.....	23
4.5. Variables evaluadas. ....	23
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	26
5.1. Caracterización de las NPs.....	26
5.2. Prueba de germinación estándar.....	32
5.3. Efecto de las NPs en la calidad fisiológica de las plántulas.....	36
6. CONCLUSIONES.....	46
7. RECOMENDACIONES .....	47

<b>8. LITERATURA CONSULTADA.....</b>	<b>48</b>
--------------------------------------	-----------

### **LISTADO DE CUADROS**

<b>Cuadro 1.</b> Equipos y métodos de caracterización de las NPs .....	17
<b>Cuadro 2.</b> Tratamientos utilizados para el experimento. ....	19
<b>Cuadro 3.</b> Itinerario semanal de mediciones y conteos. ....	24
<b>Cuadro 4.</b> Metodologías empleadas durante la fase experimental. ....	25
<b>Cuadro 5.</b> Cantidad de NPs ZnO y ZnO-Mg incorporadas en cada semilla de tomate. ....	32

## LISTADO DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa de Cuautitlán Izcalli con colindancias municipales (Dirección de Planeación y Evaluación Municipal, 2012).....	15
<b>Figura 2.</b> Cubierta plástica donde se realizó el experimento, perteneciente al módulo de hidroponía del CEA, FES-C, UNAM (Google Earth, 2024). .....	15
<b>Figura 3.</b> Climograma semanal del 10 de noviembre al de 22 diciembre de 2023. (Estación meteorológica Almaraz, 2023) (Elaboración propia). .....	16
<b>Figura 4.</b> Desinfección de las semillas de tomate con hipoclorito de sodio al 1% (0.5 mL NaClO/50 mL H <sub>2</sub> O).....	20
<b>Figura 5.</b> Preparación de las suspensiones de las NPs. ....	20
<b>Figura 6.</b> Matraces conteniendo la solución de NPs y semillas en agitación constante. ....	21
<b>Figura 7.</b> Distribución de los tratamientos en la charola de germinación 1 (concentración de 25 mgL <sup>-1</sup> ). .....	22
<b>Figura 8.</b> Charolas de germinación con los tratamientos diferenciados e identificados. ....	22
<b>Figura 9.</b> Espectro de absorción UV-Vis de las NPs ZnO-Mg 0% (línea negra), ZnO-Mg 2% (línea roja), y ZnO-Mg 4% (línea azul). .....	27
<b>Figura 10.</b> Espectros FTIR de las NPs ZnO-Mg 0% (línea negra), ZnO-Mg 2% (línea roja), y ZnO-Mg 4% (línea azul).....	27
<b>Figura 11.</b> Espectros de fluorescencia de las NPs ZnO-Mg 0% (línea negra), ZnO-Mg 2% (línea roja), y ZnO-Mg 4% (línea azul). .....	28
<b>Figura 12.</b> Gráfico de potencial zeta de las NPs ZnO-Mg 0% (línea negra), ZnO-Mg 2% (línea roja), y ZnO-Mg 4% (línea azul). .....	29
<b>Figura 13.</b> Gráfica obtenida por DLS para la distribución del tamaño de las NPs ZnO-Mg 0% (línea negra), ZnO-Mg 2% (línea roja), y ZnO-Mg 4% (línea azul). .....	30
<b>Figura 14.</b> Micrografías SEM e histogramas de tamaño de partícula, de NPs ZnO-Mg 0% (a, b), ZnO-Mg 2% (c, d), y ZnO-Mg 4% (e, f) respectivamente. ....	31
<b>Figura 15.</b> Gráfica representativa a la prueba de medias en la variable de respuesta germinación. ....	33

<b>Figura 16.</b> Gráfica representativa a la prueba de medias en la variable de respuesta semillas contaminadas con microorganismos. ....	34
<b>Figura 17.</b> Semilla con germinación adecuada (a), semilla con signos de toxicidad (b), semilla contaminada (c), semilla sin germinación (d). ....	35
<b>Figura 18.</b> Ilustración de la contaminación de la semilla de tomate en los tratamientos: (a) Control, (b) ZnO-Mg 0% [25], (c) ZnO-Mg 2% [25], (d) ZnO-Mg 4% [25]. ....	36
<b>Figura 19.</b> Gráfica representativa a la prueba de medias en la variable de respuesta emergencia. ....	37
<b>Figura 20.</b> Gráfica representativa a la prueba de medias para la variable de respuesta altura de plántula. ....	38
<b>Figura 21.</b> Gráfica representativa a la prueba de medias para la variable de respuesta número de hojas. ....	39
<b>Figura 22.</b> Gráfica representativa a la prueba de medias para la variable de respuesta diámetro del tallo. ....	40
<b>Figura 23.</b> Gráfica representativa a la prueba de medias para la variable de respuesta longitud de raíz. ....	41
<b>Figura 24.</b> Gráfica representativa a la prueba de medias para la variable de respuesta peso fresco. ....	42
<b>Figura 25.</b> Gráfica representativa a la prueba de medias para la variable de respuesta peso en seco. ....	43
<b>Figura 26.</b> Gráfica representativa a la prueba de medias para la variable de respuesta contenido de clorofila total. ....	44

## RESUMEN

El mundo atraviesa la imperante necesidad de desarrollar una agricultura de enfoque más sostenible y con énfasis en prácticas que minimicen el impacto ambiental y promuevan la biodiversidad. Es así como, en años recientes, la nanotecnología ha explorado el uso de nanopartículas (NPs) como el óxido de zinc (ZnO), en respuesta a la necesidad de mejorar la eficiencia de los fertilizantes y promover prácticas más sostenibles. Este trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto de las NPs de ZnO dopadas con magnesio (ZnO-Mg) sobre la calidad fisiológica y sanitaria de plántulas de tomate de cáscara. Para este propósito, se sintetizaron y se caracterizaron las NPs ZnO-Mg para garantizar su conformación químico-estructural. Las variables evaluadas para las plántulas de tomate fueron focalizadas a determinar el potencial de las NPs ZnO-Mg como mejorador de la tasa de germinación/emergencia, también se determinó la calidad fisiológica de las plántulas a través de mediciones morfológicas como la altura, diámetro de tallo, número de hojas, longitud de la raíz, contenido de materia seca y contenido de clorofilas totales; además de cuantificar el potencial antimicrobiano de las NPs ZnO al doparlas con tres niveles de Mg (0, 2, y 4%) y aplicarlas en cuatro concentraciones (25, 50, 100, y 200 mgL<sup>-1</sup>). El experimento se condujo como un diseño experimental de parcelas divididas con cuatro repeticiones. Los resultados de la caracterización de NPs mostraron una síntesis de NPs ZnO y ZnO-Mg adecuada, que cumplió con las condiciones de los materiales nanoestructurados. Las NPs fueron aplicadas en las semillas vía acondicionamiento osmótico, y se determinó que, dependiendo de la concentración aplicada, cada semilla tuvo entre 0.015 y 0.154 µg de NPs ZnO-Mg. Los resultados de las variables evaluadas para las plántulas mostraron que, uno o más tratamientos de NPs ZnO-Mg afectaron significativamente a la calidad fisiológica y sanitaria. Por ejemplo, las semillas tratadas con concentraciones de 100 y 200 mgL<sup>-1</sup> de NPs presentaron nula contaminación microbiana. También, la aplicación de NPs ZnO dopadas con 2% de Mg y suministradas en una concentración de 50 mgL<sup>-1</sup> (ZnO-Mg 2% [50]) influyeron significativamente en la tasa de emergencia (95%). La aplicación de NPs ZnO a las diferentes concentraciones y dopajes de Mg, afectó significativamente la altura de la plántula, obteniendo tamaños más bajos en comparación con el tratamiento control. El diámetro de tallo fue afectado significativamente por el tratamiento ZnO-Mg 4% [25] que presentó diámetro mayor (1.76 mm). El tratamiento ZnO-Mg 4% [100] generó diferencias significativas obteniendo un promedio de 0.213 gramos de materia seca por plántula. En cuanto al contenido de clorofilas totales, a pesar de que el tratamiento ZnO [50] no

presentó diferencia estadísticamente significativa en comparación con el grupo control (322.4 vs 269.8  $\mu\text{g}$  de clorofila/g de tejido fresco), se observaron diferencias significativas en el resto de los tratamientos. Para las variables restantes (tasa de germinación, número de hojas, y longitud de raíz) no se observaron diferencias significativas. En conclusión, la caracterización de las NPs mostró una síntesis adecuada del ZnO y ZnO-Mg nanoestructurado. Los efectos en la calidad de las plántulas de tomate fueron los siguientes: ZnO sin dopaje de Mg, mejoró significativamente la germinación y el contenido de clorofilas totales; el grupo ZnO-Mg 2% presentó los promedios más altos en emergencia y longitud de la raíz; y el grupo ZnO-Mg 4% produjo la altura mayor de la plántula, el diámetro mayor del tallo, y el contenido más alto de materia seca. La dosis adecuada de NPs para aplicar en las semillas de tomate es de  $100 \text{ mgL}^{-1}$  (equivalente a  $0.068 \mu\text{g}$  NPs/semilla, en promedio), debido a que esta dosis influyó a la nula contaminación por microorganismos en la semilla, mostró una tendencia creciente en la altura de la plántula, ascendió el valor del diámetro del tallo, y tuvo el contenido mayor de materia seca.

**Palabras clave:** Nanopartículas de ZnO dopadas con magnesio, plántulas de tomate de cáscara, calidad fisiológica y sanitaria.

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde la revolución verde, surgió el uso de fertilizantes convencionales, hechos a base de componentes químicos, y que se aplican comúnmente en los suelos; con estos, se suplía la necesidad de brindarles a las plantas los nutrientes conforme fueran requiriéndolos, con la idea de que, al nutrir las plantas, éstas expresaran mejores características organolépticas y fisiológicas. Sin embargo, el uso de fertilizantes convencionales es un tema controversial por el daño que provocan a los suelos donde son aplicados, debido a que al usarse en cantidades grandes y con recurrencia, éstos pueden dañar las propiedades fisicoquímicas y la estructura del suelo (Molina, 2021). Además, el incremento del precio en los fertilizantes convencionales hace que esta alternativa para nutrir a las plantas sea cada vez menos rentable (Enríquez, 2021).

Los productores han recurrido a la fertilización orgánica, la rotación de cultivos, y la aplicación de microorganismos para la fijación de elementos, como alternativa al uso de estos fertilizantes, por su cualidad de nutrir a los cultivos de forma natural; no obstante, estas alternativas han mostrado carencias de efectividad y aplicación en varios cultivos (Gutiérrez *et al.*, 2015)

Recientemente, la nanotecnología ha mostrado efectos benéficos en la agricultura con el uso de las nanopartículas (NPs) que proveen nutrientes a las plantas, por lo que han adoptado el término de nanofertilizantes para describir la función de las NPs (Mejía & Pumaylle, 2021) que usualmente son aplicadas en la semilla por vía acondicionamiento osmótico. Por lo que la aplicación de nanofertilizantes podría minimizar los problemas de alteración en la estructura de los suelos, la contaminación que provocan los envases de fertilizantes convencionales, y la baja rentabilidad provocada por la compra de fertilizantes a costos altos (Rojas & Ortuño, 2007).

Uno de los materiales más estudiados como nanofertilizante es el óxido de zinc (ZnO), y diversos estudios han sugerido que éste tiene la capacidad de mejorar el crecimiento en diferentes especies de plantas (García *et al.*, 2019), además de actuar como agente antimicrobiano (Vázquez *et al.*, 2020). Por este motivo, en el presente proyecto de tesis se evaluará el efecto de las nanopartículas de óxido de zinc dopadas con magnesio (NPs ZnO-Mg) a diferentes concentraciones sobre la calidad fisiológica y sanitaria de plántulas de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa*), haciendo uso de herramientas que midan intrínsecamente estos parámetros.

## **2. OBJETIVOS**

Evaluar el efecto de la aplicación de nanopartículas de óxido de zinc dopadas con magnesio (NPs ZnO-Mg) a diferentes concentraciones sobre la calidad fisiológica y sanitaria de plántulas de tomate de cáscara.

### **2.1. Objetivos particulares.**

- Sintetizar NPs ZnO-Mg con tres niveles de dopaje (0, 2, y 4%), y caracterizar los materiales por técnicas espectroscópicas y microscópicas.
- Aplicar las NPs ZnO-Mg a las semillas de tomate de cáscara vía acondicionamiento osmótico a diferentes concentraciones (0, 25, 50, 100, y 200 mgL<sup>-1</sup>).
- Evaluar la calidad fisiológica y sanitaria de las plántulas de tomate de cáscara para determinar la concentración óptima de NPs ZnO-Mg.

### **2.2. Hipótesis.**

La aplicación de nanopartículas de óxido de zinc dopadas con magnesio (NPs ZnO-Mg) tendrá un efecto significativo en la calidad fisiológica y sanitaria de las plántulas de tomate de cáscara.

## **3. MARCO TEORICO**

### **3.1. Nanociencia y nanotecnología.**

La nanociencia y la nanotecnología son áreas de estudio interdisciplinarias de la ciencia y la tecnología, que incluyen temáticas como química, física, biología, electrónica, medicina e ingeniería. El término nanociencia hace referencia al análisis de la materia en el rango de 1 a 100 nm, donde un nanómetro es la milmillonésima parte de un metro (Mendoza & Rodríguez, 2007). La nanociencia es especialmente singular en comparación con otras disciplinas científicas, ya que, a escala nanométrica, se pueden observar fenómenos que no se detectan a escalas macroscópicas. Estos fenómenos muchas veces no se pueden explicar a través de las leyes de la física clásica, sino que se investigan mediante la mecánica cuántica (Mendoza, 2018).

Por su parte, la nanotecnología se refiere a la manipulación y control de la materia a escala nanométrica, con el objetivo de influir en sus propiedades, que tienen aplicaciones a escala macroscópica; además, implica el dominio de las técnicas utilizadas para tal propósito (Mendoza, 2018). Los materiales que se encuentran en la nanoescala exhiben propiedades completamente

distintas a sus equivalentes en tamaño másico, y éstas están en función de la composición, el tamaño de las partículas; la forma, la carga superficial, los grupos funcionales, y la fuerza de los enlaces de las partículas (Thangadurai *et al.*, 2020).

Por su cualidad de ser una ciencia relativamente nueva, las aplicaciones que se le pueden dar a esta tecnología son cada vez mayores, por ejemplo, en la medicina, la odontología, la construcción, los textiles, los automóviles, la agricultura, y los alimentos. Aunque algunas aplicaciones se encuentran aún en la fase de desarrollo, hay otras que ya se usan cotidianamente (Calle, 2010).

### **3.1.1. Nanoestructuras y nanopartículas.**

Los materiales nanoestructurados son aquellos materiales con un tamaño mínimo de entre 1-100 nm por lo menos en una de sus dimensiones, o que tengan una estructura interna o de superficie en el orden de escala de los nanómetros (Ozin *et al.*, 2009). Identificar la dimensionalidad y los tamaños de las nanoestructuras ha permitido clasificarlas en cuatro tipos (Bansi & Azahar, 2018):

- Cerodimensionales (0D) con tamaños entre 1-100 nm, como las NPs.
- Unidimensionales (1D) entre 1-100 nm con las otras dos dimensiones en el orden de las micras, como los nanoalambres, nanofibras, nanotubos, entre otros.
- Bidimensionales (2D) en la escala nanométrica y con la otra dimensión en la escala de las micras, como las películas delgadas.
- Tridimensionales (3D), donde no hay dimensiones a nanoescala ya que todas las dimensiones están a microescala. Los materiales en bulto son 3D ya que se componen de bloques individuales que pueden estar en una escala nanométrica.

Las propiedades físicas, químicas, y comportamiento en aplicaciones biológicas pueden cambiar según el tipo de nanoestructura. Las NPs metálicas o de óxidos metálicos son uno de los materiales más estudiados debido a su enorme potencial en distintos campos de aplicación. Las nanopartículas metálicas con capacidad antimicrobiana han despertado interés científico desde años atrás, pero éste se incrementó con la aparición de la pandemia de coronavirus (COVID-19) (Cadenas, 2021).

### **3.1.2. Aplicación de nanopartículas en la agricultura.**

Algunos otros beneficios de las NPs en la industria agroalimentaria engloban la capacidad antimicrobiana, empaques innovadores que indiquen la degradación del alimento, adición de vitaminas y/o minerales, y la mejora de la calidad y vida anaquel de los productos. Además, el

empleo de nanosensores permite precisar, detectar, y entregar la cantidad correcta de nutrientes y plaguicidas a las plantas, lo que instintivamente llevaría a la reducción en el uso de agroquímicos (Lira *et al.*, 2018).

En la agricultura, se han encontrado diversas aplicaciones de las NPs, por ejemplo, en un estudio realizado por Mejia & Pulmaylle (2021), donde aplicaron a cultivos de cereales NPs de diversos elementos, encontraron que las NPs de óxido de zinc, silicio, hierro, y magnetita, a pesar de tener diferentes tamaños, podían tener efectos en los parámetros de crecimiento de los cereales al aplicarse de forma foliar. Por otro lado, Carbajal (2021), encontró que podía mejorar la calidad de aguas grises para riego de cultivos, al utilizar fotocátalisis solar con NPs de TiO<sub>2</sub>. Posteriormente, Bello & Spinoso (2023), utilizaron NPs de plata en la micropropagación de plantas, y concluyeron que las NPs reducían la contaminación de los cultivos *in vitro*, inhibían los efectos del etileno ocasionado por el cierre hermético de los recipientes de cultivo, y también promovían el desarrollo durante la micropropagación. Recientemente, Ciriaco (2024), encontró que se podía inhibir el hongo *B. cinérea Pers* en cultivos de maíz contaminado por aguas residuales domésticas al aplicarle NPs de SiO<sub>2</sub> en concentraciones altas durante un periodo de 5 días.

### **3.2. Nanopartículas de óxido de zinc y magnesio como nanofertilizante.**

En años recientes, entre las NPs más estudiadas para su utilización en el área agrícola y con aplicaciones para la fertilización, se encuentra el óxido de zinc (ZnO) y el óxido de magnesio (MgO). El zinc (Zn) es un elemento requerido para la síntesis de carbohidratos durante la fotosíntesis y en la transformación de los azúcares en almidón, además de participar en el metabolismo de hormonas al regular el nivel de auxinas a través de la síntesis del aminoácido triptófano (Amezcuca & Lara, 2017). Por su parte, el magnesio (Mg), es fundamental en la intervención de la síntesis de xantofilas y carotenoides, es activador de varias enzimas particularmente aquellas involucradas en el metabolismo de carbohidratos y proteínas, contribuyendo al mantenimiento de una turgencia óptima de las células y participando en la formación de carbohidratos en la planta. Además, este elemento también participa en el proceso de la fotosíntesis, ya que es un componente básico de la clorofila (Cakmak & Yazici, 2010).

Para cubrir la demanda de Zn en las plantas, la agricultura utiliza fertilizantes como sulfato de zinc (ZnSO<sub>4</sub>) o quelato de EDTA-Zn, por su parte, para cubrir la demanda de Mg se utiliza sal de Epsom (MgSO<sub>4</sub>, 7H<sub>2</sub>O) y óxido de magnesio (MgO). Estos fertilizantes se aplican comúnmente

en los suelos con deficiencia de los elementos, y también, se aplican de manera foliar cuando las plantas muestran signos de deficiencia del micronutriente (García *et al.*, 2019); sin embargo, la eficiencia y la absorción del Zn a través de las hojas está determinada por la fuente de los micronutrientes (Doolette *et al.*, 2018).

A pesar de que, los materiales que se encuentran en la nanoescala presentan propiedades completamente diferentes a sus homólogos en tamaño másico (Thangadurai *et al.*, 2020), aludiendo al Zn y el Mg, se ha encontrado que las NPs procedentes de óxidos de estos elementos han tenido efectos benéficos en diversos cultivos agrícolas, al aplicarse como nanofertilizantes. Además de tener en cuenta que las NPs ZnO han sido acreditada por la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA, por sus siglas en inglés) como una sustancia Generalmente Reconocido como Segura, (de estatus GRAS, por sus siglas en inglés) (Kumar *et al.*, 2019), estudios han demostrado el potencial de las NPs ZnO en la estimulación de la germinación de las semillas y en el crecimiento de las plantas, así como en la supresión de enfermedades y en la protección de las plantas por su capacidad como agente antimicrobiano (Vázquez *et al.*, 2020).

Por ejemplo, en un estudio realizado por Rivera *et al.*, (2021) en el cultivo de melón (*Cumumis melo L.*), encontraron que al aplicar NPs ZnO de manera foliar a diferentes concentraciones se incrementó el peso del fruto, y mejoró el contenido nutracéutico. Contrastando la aplicación foliar de NPs, Estrada-Urbina *et al.*, (2019) seleccionaron una variedad nativa de maíz mexicano, y aplicaron NPs ZnO a las semillas, por medio de una suspensión de recubrimiento hecha a base de almidón de maíz, agua desionizada y glicerol, las semillas las sumergían en la suspensión preparada durante 10 minutos y las secaban a temperatura ambiente; esta aplicación produjo una mejora significativa en la concentración de clorofila en las hojas, mejoró los componentes de la mazorca e incrementó el rendimiento del grano. En otro estudio, el acondicionamiento osmótico en semillas de frijol con NPs de ZnO dopadas con cobre afectó positivamente a la germinación, la longitud del tallo, la longitud de las raíces, y el número de raíces secundarias (López-Patricio, 2023).

Las nanopartículas de óxido de magnesio (NPs MgO) han tenido un efecto positivo en la fisiología y bioquímica de las plantas; por ejemplo, González *et al.*, (2023) encontraron que aplicar NPs MgO al cultivo de betabel, se incrementaba considerablemente el contenido de betacinas (pigmento que da su color característico a la raíz de las remolachas), al igual que el porcentaje de

germinación y el vigor de las plántulas. También se han notado efectos benéficos de la aplicación de NPs MgO extraídas de manzanilla utilizadas como biofertilizante, al aplicarse en semillas de maíz, pues éstas incrementaron su porcentaje de germinación (Zhañay, 2021). De manera similar, Rivera (2022) encontró que al aplicar NPs MgO en semillas de maíz, mejoró el vigor, el peso seco de la plúmula, la longitud media de plúmula, y la longitud media de la radícula.

Estudios realizados por diversos grupos de investigación coinciden en que ambos nanomateriales (ZnO y MgO) presentan beneficios en el desarrollo y el crecimiento de las plantas, por lo que, aplicar conjuntamente estos compuestos a las plantas incrementaría el impacto positivo. Una manera de realizar esta aplicación de los compuestos es por medio de una modificación estructural de las NPs ZnO con Mg, acto denominado dopaje, y que se describe como el proceso mediante el cual se hace una sustitución parcial de los átomos de un elemento con átomos semejantes (Moebis *et al.*, 2021).

### **3.3. Desarrollo de plántulas de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa*).**

*Physalis ixocarpa* es una planta herbácea, anual, de 40 a 120 cm de altura o más dependiendo de los hábitos de crecimiento. Tiene un ciclo de vida de 70 a 110 días desde la siembra hasta la senescencia dependiendo de la variedad. Una vez que emerge la plántula, inicia un crecimiento lento, de aproximadamente 1 cm por día; posteriormente a los 25 días, el crecimiento se acelera y se estabiliza. La temperatura óptima promedio que demanda el tomate de cáscara al momento de sembrar es de 20 a 25 °C, su crecimiento vegetativo requiere de 22 a 26 °C; sin embargo, tolera bien las sequías y el frío. La siembra debe realizarse a 2 cm de profundidad en sustrato húmedo, para llegar al punto de trasplante cuando la planta alcance los 10 cm de altura (López, 2022).

#### **3.3.1. Evaluación de agentes patógenos en la germinación.**

Entre las características que tienen en común las hortalizas como el tomate de cascará, es que se propagan por semilla botánica, la cual tiene un papel relevante en la sanidad de los cultivos, pues es la principal vía de diseminación y sobrevivencia de la mayoría de las bacterias que afectan a las hortalizas (Rodríguez, 2013).

En aquellos cultivos donde se hace trasplante y se requieren prácticas agrícolas como: deshojado, deschuponado, podas, entre otras; se favorecerá la diseminación de patógenos si no se efectúa el control adecuado a una semilla infectada (Navarrete *et al.*, 2014). Los hongos patógenos que

afectan principalmente a las semillas de hortalizas pertenecen a los géneros *Aspergillus*, *Rhizopus*, *Fusarium* y *Penicillium*, estos hongos filamentosos se encuentran principalmente en los suelos, y por su diseminación llegan incluso a las partes aéreas de las plantas como los frutos, posteriormente infectando las semillas (Álvarez *et al.*, 2021).

Para evaluar la presencia de agentes patógenos, así como los tratamientos fitosanitarios en las semillas, la Organización Norteamericana de Protección a las Plantas, NAPPO (por sus siglas en inglés) (2022) propone que es apropiado cultivar semillas bajo condiciones propicias a enfermedades para determinar si los patógenos viables aún están presentes. Además, antes de cultivar semillas, existen diversos tipos de métodos *in vitro* que pueden utilizarse para verificar la presencia de patógenos, como la germinación de semillas en un medio de cultivo o en papel secante humedecido con agua estéril.

### **3.3.2. Variables que dan calidad a la plántula.**

El desarrollo de las plántulas debe realizarse en almácigo, que es la práctica específica en donde se realiza la germinación de las semillas y el desarrollo de plántulas de hortalizas de importancia económica, por lo que es importante ubicar un sitio que reúna las condiciones adecuadas, buscando control del clima, un sustrato limpio y en general, bajo una serie de normas de manejo que garanticen el mayor número posible de plántulas de alta calidad (Pro NAP, 2011).

De acuerdo con García-López *et al.* (2016), la calidad fisiológica hace referencia a mecanismos intrínsecos de la semilla que determinan su capacidad de germinación, la emergencia y el desarrollo estructural de la plántula; de este modo, Soto (2018) propone que la calidad de las plántulas se puede evaluar morfológicamente, al realizar mediciones en los órganos que la constituyen: la raíz, el tallo, y las hojas. Esto permite realizar procedimientos más sencillos de medición en el almácigo, para posteriormente hacer una interpretación de la medición y la posible causa-efecto que provoca dichos valores.

Las plántulas de especies hortícolas que crecen en condiciones de invernadero con altos niveles de humedad relativa, escaso movimiento del aire, y temperaturas elevadas, su patrón de crecimiento predominante se realiza en altura y como consecuencia las plántulas resultan etioladas cuando éstas son trasplantadas. Por estos motivos, obtener plántulas de menor altura y más endurecidas antes del trasplante es el principal objetivo (Wien, 1997; Soto, 2018).

Por otra parte, el equilibrio funcional entre las raíces y los vástagos corresponde a un crecimiento interrelacionado en el que los cambios en la tasa del crecimiento aéreo se expresan en la raíz y viceversa. Además, un sistema radicular corto y poco proliferado explora un volumen menor de suelo para la obtención de agua y nutrientes, lo que a su vez produce estrés en la zona radicular, que es expresado en la parte aérea, afectando la partición de materia seca (Bennie, 1991). Otra variable indicadora de plántulas sanas y vigorosas es el contenido de clorofila, entendiéndose que la clorofila es una biomolécula que permite llevar a cabo el proceso de fotosíntesis que es la conversión de energía luminosa en energía química, figurando que, a mayor contenido de clorofila, mayor capacidad de asimilar los nutrientes (Taiz *et al.*, 2014). Por otro lado, cuantificar el número de hojas puede ser un indicador secundario de contenido de clorofila, pues es en este órgano donde se encuentra la mayor reserva de esta molécula en la planta (Ruiz *et al.*, 2019).

Por lo anteriormente expuesto, el presente proyecto de tesis evaluó el potencial de las NPs ZnO-Mg como mejorador en la calidad fisiológica de las plántulas, determinando la tasa de germinación/emergencia, la altura de la plántula, el diámetro de tallo, el número de hojas, la longitud de la raíz, el contenido de materia seca y el contenido de clorofilas totales, además de cuantificar el potencial antimicrobiano de las NPs ZnO-Mg.

## **4. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **4.1. Descripción del área de estudio.**

A continuación, se describen las condiciones del área de estudio.

#### **4.1.1. Localización geográfica.**

El área de estudio se encuentra en el Municipio de Cuautitlán Izcalli en el Estado de México, entidad localizada en la longitud oeste  $99^{\circ} 11' 42''$  y en la latitud norte  $19^{\circ} 41' 35''$  a 2,256 metros sobre el nivel del mar (msnm) (Figura 1).



**Figura 1.** Mapa de Cuautitlán Izcalli con colindancias municipales (Dirección de Planeación y Evaluación Municipal, 2012).

El sitio experimental se ubicó en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (FES-C), en la cubierta plástica número 2 del módulo de hidroponía, del Centro de Enseñanza Agropecuaria (CEA) de la FESC localizado entre las coordenadas norte  $19^{\circ}41'46.43''$ , oeste  $99^{\circ}11'21.97''$  y norte  $19^{\circ}41'46.29''$ , oeste  $99^{\circ}11'21.82''$ , durante el ciclo otoño-invierno (O-I) 2023 (Figura 2).

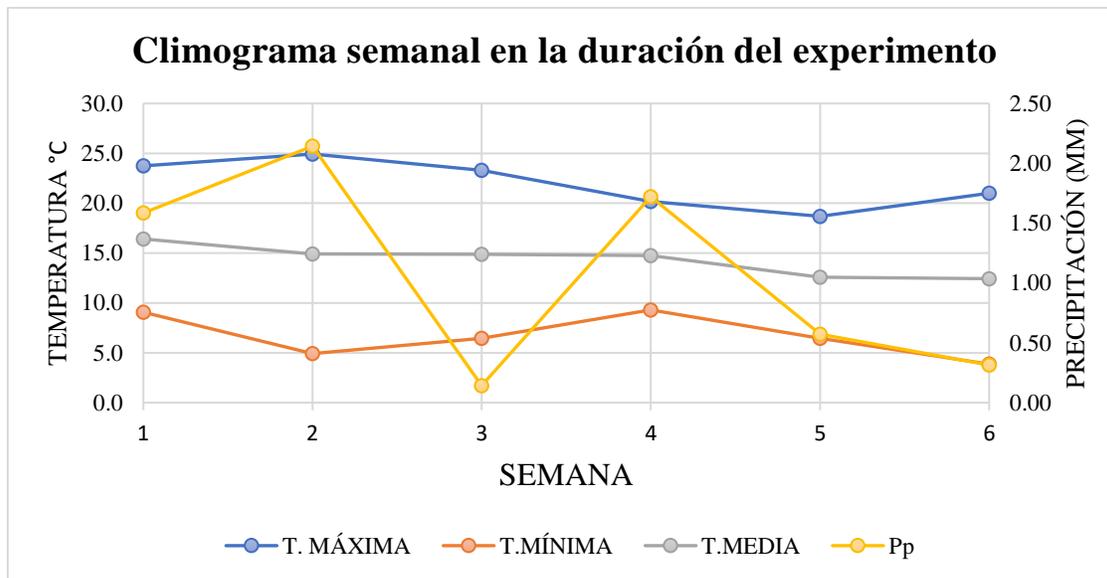


**Figura 2.** Cubierta plástica donde se realizó el experimento, perteneciente al módulo de hidroponía del CEA, FES-C, UNAM (Google Earth, 2024).

#### 4.1.2. Características agroclimáticas.

Rodríguez (2014) evaluó los elementos del clima registrados en la estación meteorológica Almaraz, la más cercana al sitio experimental; caracterizó la zona como un clima templado subhúmedo, el más seco de los subhúmedos, con lluvias en verano, registró poca oscilación térmica y un porcentaje de lluvia invernal de 5.14%.

Durante el periodo experimental que comprendió del 10 de noviembre al 22 de diciembre del 2023, se registraron en la zona promedios de temperatura máxima de 22 °C, mínima de 6.7 °C, y media de 14.3°C. Lo anterior se desglosa en el siguiente climograma (Figura 3).



**Figura 3.** Climograma semanal del 10 de noviembre al 22 de diciembre de 2023. (Estación meteorológica Almaraz, 2023) (Elaboración propia).

## 4.2. Métodos de laboratorio.

La metodología en el laboratorio constó de tres etapas.

### 4.2.1. Síntesis y caracterización de las nanopartículas.

Para la síntesis de NPs ZnO-Mg, se utilizaron como precursores nitrato de zinc hexahidratado ( $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ), nitrato de magnesio hexahidratado ( $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ), hidróxido de potasio (KOH), y agua desionizada.

Las NPs ZnO-Mg fueron sintetizadas por el método de co-precipitación de acuerdo con lo reportado por Estrada-Urbina *et al.* (2019) con algunas modificaciones. Para la síntesis de las NPs ZnO se prepararon 50 mL de una disolución acuosa de nitrato de zinc 0.1 M. la cual se mantuvo en agitación por 25 minutos a temperatura ambiente, enseguida se adicionaron 20 mL de hidróxido de potasio 0.5 M, el valor del pH de la reacción fue de 9.5. Para el dopaje de las NPs ZnO se utilizó la cantidad de nitrato de magnesio necesario para alcanzar un valor de 2 y de 4%. En esta síntesis, el nitrato de magnesio fue incorporado en la disolución de nitrato de zinc, la mezcla se agitó por

25 minutos y se adicionaron 20 mL de hidróxido de potasio. Las muestras obtenidas se dejaron en reposo por 24 horas, enseguida el precipitado fue lavado por triplicado utilizando ciclos de centrifugado (7 minutos a 7000 rpm) y resuspensión en agua desionizada. El precipitado fue secado a una temperatura de 170 °C durante 2 horas, posteriormente la muestra fue homogenizada en un mortero de ágata y almacenada en recipientes herméticos para su posterior caracterización.

Las NPs ZnO-Mg fueron caracterizadas por espectroscopia de absorción UV-Vis, espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR), espectroscopia de fluorescencia, carga superficial (potencial Zeta), distribución de tamaño por dispersión de luz dinámica (DSL), y microscopía electrónica de barrido (SEM). En el Cuadro 1 se ilustran los equipos utilizados para realizar dichas caracterizaciones, al igual que se describe brevemente la metodología empleada.

**Cuadro 1.** Equipos y métodos de caracterización de las NPs.

<i>Método de caracterización</i>	<i>Equipo utilizado</i>	<i>Descripción metodológica</i>
Espectroscopia de absorción UV-Vis.	Espectrofotómetro UV-Vis Cary 8454, Agilent. 	La caracterización consistió en medir una alícuota de 1 mg de NPs ZnO-Mg suspendida en agua en una celda de cuarzo de longitud de paso óptico de 1 cm. El espectro de absorción característico se colectó en el intervalo de longitud de onda de 200 a 1100 nm (Estrada-Urbina, <i>et al.</i> , 2018).
Espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)	Espectrómetro FT-IR/NIR-MIR Frontier SP-8000, Perkin-Elmer. 	Se colocaron 25 mg de NPs ZnO-Mg en el aditamento ATR de diamante y la muestra se presionó sobre el cristal. Los espectros se registraron de 4000 a 350 $\text{cm}^{-1}$ aplicando 16 escaneos con una resolución de 4 $\text{cm}^{-1}$ (Sánchez-Carrillo, 2021).

<p>Espectroscopia de fluorescencia</p>	<p>Espectrofluorómetro LS-55 Perkin-Elmer</p> 	<p>Los espectros se registraron en el rango de longitud de onda de 350 a 600 nm utilizando una celda de cuarzo de 1 cm de recorrido. El espectro de fluorescencia se capturó en una longitud de onda de excitación de 325 nm utilizando rendijas de excitación y emisión de 10 nm (Estrada-Urbina, <i>et al.</i>, 2018).</p>
<p>Caracterización de la carga superficial y distribución del tamaño</p>	<p>Zetasizer PRO, Malvern</p> 	<p>Las muestras de nanopartículas se diluyeron adecuadamente con agua desionizada para reducir los efectos de dispersión y viscosidad. Las muestras se analizaron en una celda capilar a temperatura ambiente. Se midieron triplicados de cada muestra y los resultados se analizaron utilizando el software ZS Xplorer. (Aranda-Barradas <i>et al.</i>, 2022)</p>
<p>Microscopia electrónica de barrido</p>	<p>Microscopio Electrónico de Barrido Jeol-JSM 6510</p> 	<p>Muestras de aproximadamente 500 mg de NPs ZnO-Mg, fueron sometidas a una descarga de plasma de oro para darles propiedades conductoras, posteriormente se colocaron en la cámara del microscopio electrónico, mediante el cual, por medio de un haz de electrones, se observaron las muestras a 50,000 X. (Ipohorski &amp; Bozzano, 2013).</p>

#### 4.2.2. Distribución de los tratamientos.

Se dopo con 0, 2, y 4% de Mg al ZnO, estimando que un dopaje de magnesio a ese nivel difícilmente causaría efectos de toxicidad. Por otra parte, aplicar concentraciones altas de NPs en diversas especies de plantas causa signos de toxicidad en diferentes órganos de la planta (Galindo-Guzmán *et al.*, 2022), por lo que, en esta investigación se decidió trabajar con una concentración máxima de 200 mgL<sup>-1</sup> y a partir de esta preparación realizar soluciones dobles seriadas, obteniendo concentraciones de 100, 50 y 25 mgL<sup>-1</sup>.

Finalmente, considerando los tres niveles de dopaje y las cuatro concentraciones, el experimento se condujo con 12 tratamientos como se ilustra en el Cuadro 2.

**Cuadro 2.** Tratamientos utilizados para el experimento.

ZnO-Mg 0% [25]	ZnO-Mg 2% [25]	ZnO-Mg 4% [25]
ZnO-Mg 0% [50]	ZnO-Mg 2% [50]	ZnO-Mg 4% [50]
ZnO-Mg 0% [100]	ZnO-Mg 2% [100]	ZnO-Mg 4% [100]
ZnO-Mg 0% [200]	ZnO-Mg 2% [200]	ZnO-Mg 4% [200]

\*[ ] El número dentro de los corchetes indica la concentración de la solución de nanopartículas en mgL<sup>-1</sup>.

#### 4.2.3. Acondicionamiento osmótico de las semillas de tomate.

Se adquirió un lote de 500 g de semilla de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa*), variedad Morelos Rendidora, procedente de la tienda de insumos agrícolas “El semillero”, ubicada en el Centro Histórico de la Ciudad de México, México.

Inicialmente, se realizó una prueba de germinación estándar empleando la metodología propuesta por el SNICS (2017), colocando las semillas de tomate en un sustrato húmedo, en condiciones controladas de temperatura, humedad, y fotoperiodo. Una vez conociendo la tasa de germinación de las semillas, se realizó el acondicionamiento osmótico de las semillas y las NPs que a continuación se describe.

- a) Se contaron y seleccionaron al azar 60 semillas por tratamiento.

- b) Se desinfectaron en una solución de hipoclorito de sodio al 1% (0.5 mL NaClO/50 mL H<sub>2</sub>O) (Figura 4).



**Figura 4.** Desinfección de las semillas de tomate con hipoclorito de sodio al 1% (0.5 mL NaClO/50 mL H<sub>2</sub>O).

- c) Las semillas se sometieron al acondicionamiento osmótico en las soluciones con la concentración de NPs correspondiente a cada tratamiento (Figura 5).



**Figura 5.** Preparación de las suspensiones de las NPs.

- d) En un matraz Erlenmeyer se colocaron las semillas y éstas fueron puestas en contacto con la solución de NPs, posteriormente los matraces fueron colocados en un agitador orbital durante 12 horas (Figura 6).



**Figura 6.** Matracas conteniendo la solución de NPs y semillas en agitación constante.

- e) Una vez transcurrido el tiempo de acondicionamiento osmótico, se realizó la siembra en las charolas de germinación.

#### **4.3. Diseño experimental y análisis estadístico.**

El experimento se realizó como un diseño experimental de parcelas divididas, en cada charola de germinación se ubicaron los 3 niveles de dopaje de Mg en ZnO (0, 2, y 4%) en una sola concentración (Figura 7), utilizando 4 charolas para cubrir las 4 concentraciones (25, 50, 100, y 200 mgL<sup>-1</sup>). Cada tratamiento incluyó 4 repeticiones de 15 plántulas, dando un total de 60 plántulas por tratamiento. Se incluyó un grupo control (semillas con acondicionamiento osmótico con agua destilada) con 60 plántulas (Figura 8).



por el método de Tukey. Se consideró un nivel de significancia de  $p < 0.05$  para rechazar la hipótesis nula.

#### **4.4. Labores agronómicas.**

Para realizar el experimento, se partió desde el acondicionamiento de las charolas de germinación, que constó de su limpieza y desinfección, después las charolas se llenaron con sustrato a base de Peat Moss y agrolita en relación 1:1 en condiciones húmedas, posteriormente se procedió a realizar la siembra de las semillas tratadas, ubicando una semilla en cada oquedad. Finalmente, las charolas de germinación se colocaron en la cubierta plástica número 2, del módulo de hidroponía del CEA-FESC, descrito geográficamente en el apartado 3.1.1. Esta estructura de cubierta plástica, con baja tecnificación cuenta con nulo control sobre las condiciones de temperatura, humedad relativa y fotoperiodo. Su uso se justificaba al utilizar la cubierta como protector de lluvia, protector a la radiación solar directa, y protector de heladas, ya que las temperaturas dentro de la cubierta fluctuaban en un incremento de entre 3 y 5 °C más que la temperatura del exterior.

Después de la siembra las labores se redujeron a regar y monitorear el avance de las plántulas. Con la aparición de las primeras hojas verdaderas, Lazcano *et al.* (2021) recomiendan realizar una fertilización líquida con sustratos interés; sin embargo, con la finalidad de evaluar el efecto de las NPs ZnO-Mg en sus diferentes concentraciones sobre la calidad fisiológica de la plántula, se optó por no fertilizar con otro medio.

#### **4.5. Variables evaluadas.**

Debido a la naturaleza de la plántula, y la manera en que se desarrolló el experimento, el avance fisiológico fue medido consustancialmente con el avance morfológico de las plántulas (tasa de germinación, tasa de emergencia, altura de la plántula, diámetro de tallo, número de hojas, longitud de raíz, determinación del contenido de materia seca, y contenido de clorofila) como lo propone Shakeel *et al.* (2019), quienes constatan que se puede medir el avance fisiológico de las plantas en relación con su avance morfológico pues ambos aspectos se influyen mutuamente; por otra parte, el avance fitopatológico fue monitoreado midiendo el porcentaje de semillas contaminadas con microorganismos.

Una vez realizada la siembra, fueron registradas semanalmente las mediciones de las variables que dan calidad fisiológica y sanitaria a las plántulas (Cuadro 3). El Cuadro 4 describe las metodologías empleadas para realizar las mediciones de las variables.

**Cuadro 3.** Itinerario semanal de mediciones y conteos.

Semana	Actividad realizada	
	Variables de calidad fisiológica	Variables de calidad sanitaria
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porcentaje de germinación</li> </ul>	
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porcentaje de emergencia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuantificación de semillas contaminadas</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altura de plántula</li> <li>• Número de hojas verdaderas</li> <li>• Diámetro del tallo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obtención de porcentaje de semilla contaminada por microorganismos</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porcentaje de emergencia</li> <li>• Altura de plántula</li> <li>• Número de hojas verdaderas</li> <li>• Diámetro del tallo</li> </ul>	
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altura de plántula</li> <li>• Número de hojas verdaderas</li> <li>• Diámetro del tallo</li> </ul>	
6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Longitud de la raíz</li> <li>• Contenido de materia seca (parte aérea y radicular)</li> <li>• Contenido de clorofila en hoja.</li> </ul>	

**Cuadro 4.** Metodologías empleadas durante la fase experimental.

<b>Variable a evaluar</b>	<b>Herramienta utilizada</b>	<b>Técnica utilizada</b>
Porcentajes de germinación, emergencia, y semilla contaminada.	NR.	Conteo unitario de cada unidad experimental, para su posterior conversión a porcentaje.
Altura de plántula	Calibrador vernier digital Mitutoyo Corp.	Medición tomada desde el área superficial del sustrato hasta el ápice de la plántula.
Número de hojas por plántula	NR.	Conteo unitario de cada unidad experimental, y dividido entre el número de plántulas emergidas del mismo tratamiento, para así obtener un promedio de hojas/plántula.
Diámetro del tallo	Calibrador vernier digital Mitutoyo Corp.	Considerando una altura de 3 cm desde el área superficial del sustrato, se realizó una medición en orientación norte- sur y otra este-oeste, posteriormente se promediaron dichas lecturas.
Longitud de la raíz	Calibrador vernier digital Mitutoyo Corp.	Medición tomada desde la base del tallo hasta la cofia radicular de la raíz principal.
Contenido de materia seca	Balanza analítica BOECO, bolsas de papel, horno de circulación de aire forzado RedLine.	Se registró el peso fresco de 5 plántulas de cada tratamiento tomadas al azar, posteriormente separadas e identificadas por medio de las bolsas de papel seco, se introdujeron en la estufa a 103 °C por 24 horas, después se volvió a registrar el peso de las muestras secas y se

		realizó una diferencia matemática para obtener el valor de materia seca.
Contenido de clorofila	Espectrofotómetro UV-Vis.	<p>Siguiendo la metodología reportada por Estrada-Urbina <i>et al.</i> (2018), se obtuvieron valores numéricos de los espectros de absorbancia de soluciones de etanol al 96%, mismos que fueron correlacionados con <math>\mu\text{g}</math> de clorofila/g de tejido, empleando los coeficientes:</p> <p>Clorofila a = <math>13.70 (A_{665}) - 5.76 (A_{649})</math>  Clorofila b = <math>25.80 (A_{649}) - 7.60 (A_{665})</math>  Clorofila total = Clorofila a + Clorofila b</p> <p>reportados por Lichtenthaler &amp; Wellburn, (1983).</p>

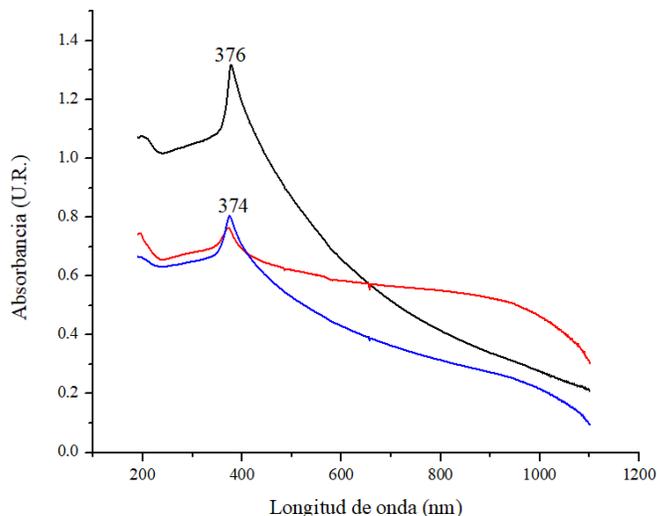
\*NR= No requerida.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Caracterización de las NPs.

#### *Espectroscopia de absorción UV-Visible*

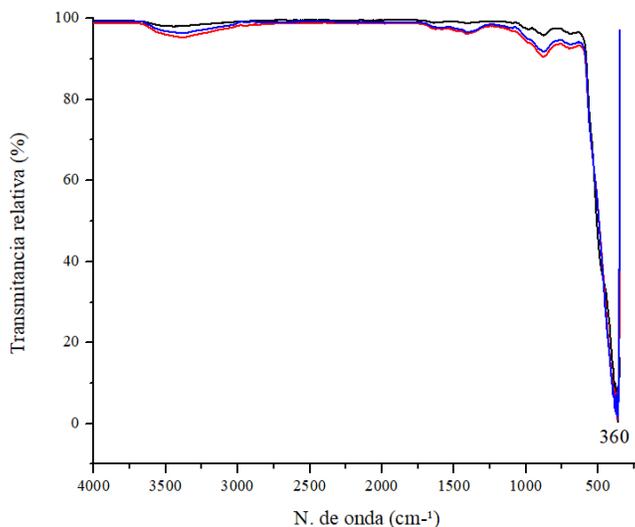
En la Figura 9 se presenta el espectro de absorción para las NPs de ZnO y las NPs de ZnO dopadas con Mg. Se ha reportado que el máximo de absorción característico para las nanopartículas de ZnO es alrededor de los 370 nm (Alarcón, 2022), coincidiendo este hecho con las sintetizadas en este trabajo, las cuales presentaron un máximo de absorción a 376 nm. Para las NPs de ZnO que contenían dopaje de 2 y 4% de Mg, su máxima absorción se observó a los 374 nm (Figura 9).



**Figura 9.** Espectro de absorción UV-Vis de las NPs ZnO-Mg 0% (línea negra), ZnO-Mg 2% (línea roja), y ZnO-Mg 4% (línea azul).

*Espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)*

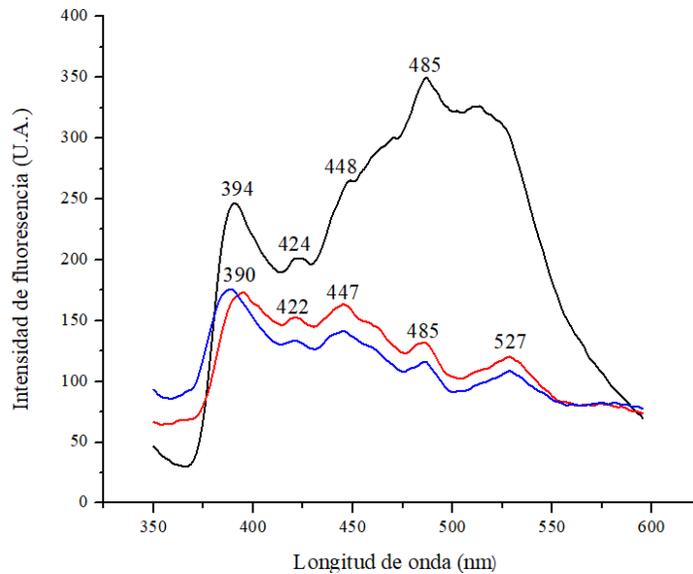
El ZnO es identificado por este método en el rango de  $4000-300\text{ cm}^{-1}$  (Ganganagappa *et al.*, 2017), debido a que en estas frecuencias se observa la vibración de los grupos funcionales que pueden estar presentes en la superficie de las nanopartículas y del enlace metal-oxígeno alrededor de los  $350\text{ cm}^{-1}$ . En la Figura 10, se muestra la formación del ZnO en los tres grupos de NPs sintetizadas, al ubicar un estiramiento metal-oxígeno cercano a los  $350\text{ cm}^{-1}$ .



**Figura 10.** Espectros FTIR de las NPs ZnO-Mg 0% (línea negra), ZnO-Mg 2% (línea roja), y ZnO-Mg 4% (línea azul).

## Espectroscopia de fluorescencia

En el espectro de fluorescencia de las NPs sintetizadas se observan varios máximos de emisión característicos del ZnO nanoparticulado, ubicados en los 394, 424, 448, y 485 nm. Mientras que las NPs ZnO que contenían dopaje de 2 y 4% de Mg mantuvieron sus máximos de emisión en los 390, 422, 447, 485, y 527 nm (Figura 11).



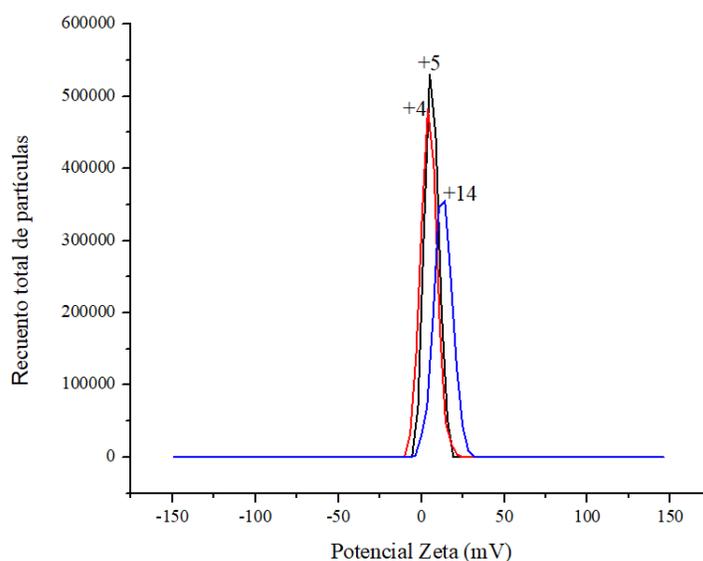
**Figura 11.** Espectros de fluorescencia de las NPs ZnO-Mg 0% (línea negra), ZnO-Mg 2% (línea roja), y ZnO-Mg 4% (línea azul).

En general, el espectro del ZnO-Mg 0% presentó una mayor intensidad de fluorescencia respecto al ZnO-Mg 2% y ZnO-Mg 4%, debido a cambios en la estructura electrónica de las NPs ZnO, la introducción de defectos provocados por el Mg, y la concentración del dopante, lo que afectó significativamente las propiedades ópticas del material (Sharma & Jeevanandam, 2012). El espectro ZnO-Mg 0% Mg es similar al reportado por Estrada-Urbina *et al.*, (2019) quienes señalaron máximos de emisión cercanos a los 400 nm, y que se explican por la recombinación de los excitones. Por su parte, la emisión verde a los 424 nm corresponde a las vacancias de oxígeno del ZnO. En los 448 y 485 nm se encuentra la emisión azul-verde originada por los defectos antisitio. Referente a las NPs ZnO-Mg 2% y ZnO-Mg 4%, que comparten un espectro similar, se observó una banda de emisión UV débil y relativamente nítida, ubicada en los 390 nm, que se debe a la emisión de excitones; y una banda de emisión amplia y más fuerte en la parte verde del espectro visible, situada en los 527 nm, atribuida a las vacancias en la superficie (Jafar *et al.*, 2016). A

grandes rasgos, la variación en la intensidad de fluorescencia entre los sistemas de NPs ZnO-Mg puede deberse al tamaño de las NPs, al método de síntesis, a la concentración, a la presencia de impurezas o como lo fue en este caso, al dopaje del ZnO con el Mg (Raja & Barron, 2024).

#### *Carga superficial y distribución del tamaño de las nanopartículas*

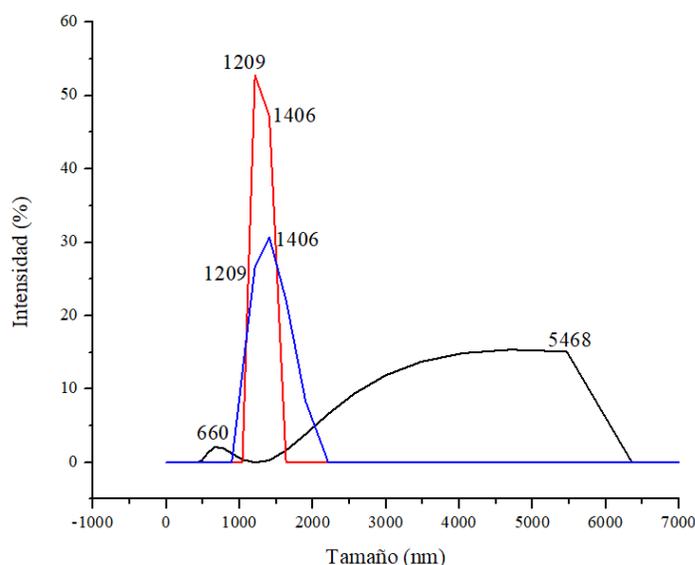
El potencial Z está relacionado a la carga superficial de las partículas, y se asocia con la estabilidad de las NPs en suspensión. Valores mayores a  $\pm 30$  milivoltios (mV) se consideran sistemas estables (Batalla *et al.*, 2014). En general, los tres sistemas de NPs presentaron valores positivos de potencial zeta, en el rango de +4 a +14 mV, considerándose un material susceptible a aglomerarse (Malvern Panalytical, 2024) (Figura 12).



**Figura 12.** Gráfico de potencial zeta de las NPs ZnO-Mg 0% (línea negra), ZnO-Mg 2% (línea roja), y ZnO-Mg 4% (línea azul).

La Figura 13 muestra la distribución de tamaño de partícula de los tres sistemas de NPs. Como se observa en la gráfica, se obtuvieron dos distribuciones de tamaño de partícula por sistema, 1209 y 1406 nm para las NPs ZnO-Mg 2% y NPs ZnO-Mg 4%, mientras que las NPs ZnO sin dopar, presentó tamaños de 660 y de hasta 5468 nm. Los resultados obtenidos, no coinciden con lo reportado por Wei *et al.* (2012), donde al caracterizar NPs ZnO comercial, obtuvieron tamaños que rondaban los 100 nm. Similarmente, Rasha *et al.*, (2021) reportaron un tamaño promedio de NPs ZnO de 94 nm. Sin embargo, como se mencionó en el análisis de potencial zeta, las NPs

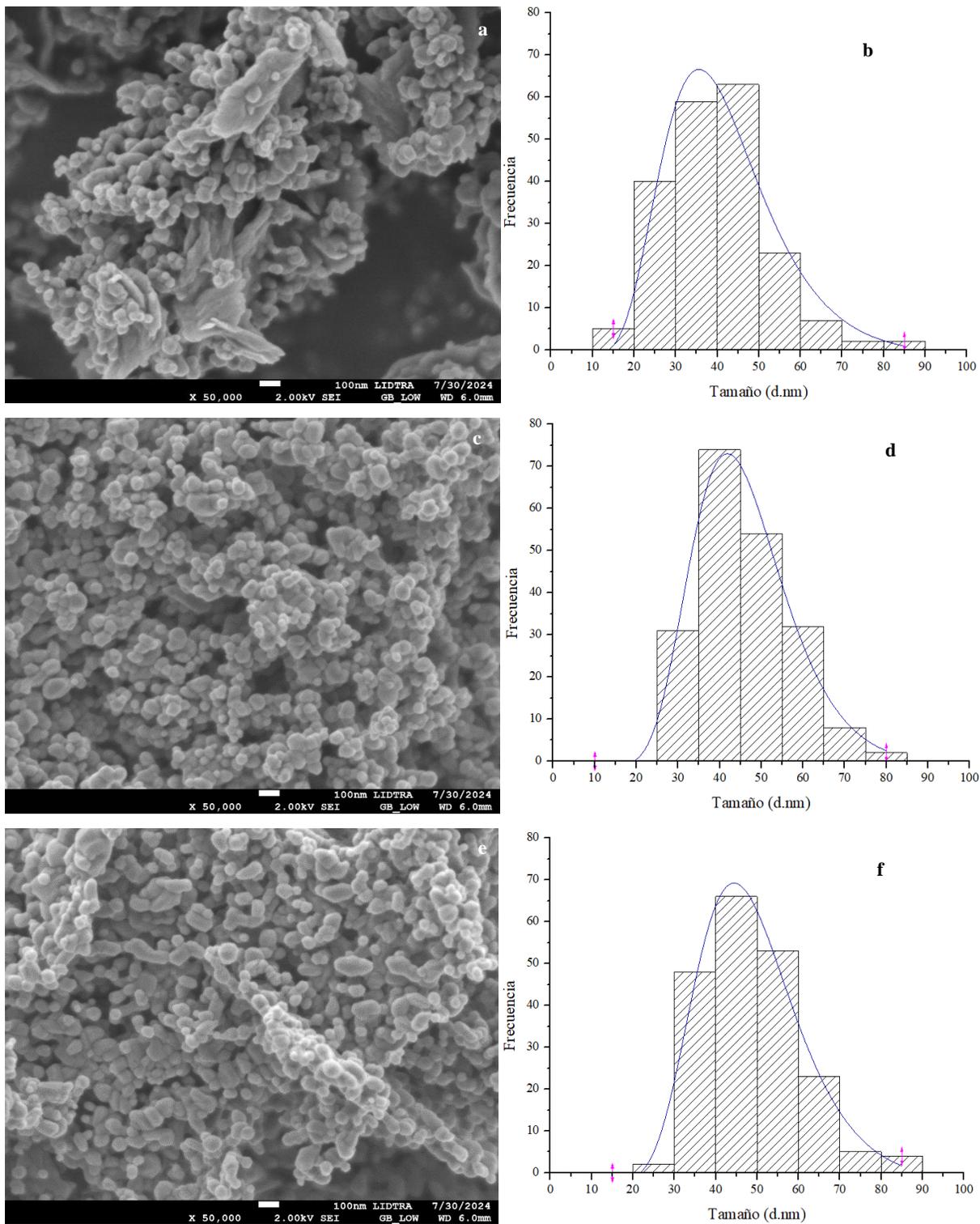
mostraron una tendencia a la aglomeración, producto de su inestabilidad en el medio acuoso. (Botasini, 2021).



**Figura 13.** Gráfica obtenida por DLS para la distribución del tamaño de las NPs ZnO-Mg 0% (línea negra), ZnO-Mg 2% (línea roja), y ZnO-Mg 4% (línea azul).

#### *Microscopía electrónica de barrido*

Para evaluar la morfología y el tamaño de las NPs ZnO y ZnO-Mg se realizó un análisis con microscopía electrónica de barrido. Como se muestra en la Figura 14 (a, c, e), la mayoría de las NPs ZnO y ZnO-Mg presentaron una forma cuasi esférica, así como un cierto grado de aglomeración. Los histogramas de distribución de tamaño se muestran en la Figura 14 (b, d, f). Un análisis cuantitativo de las imágenes reveló diámetros promedio de  $39.7 \pm 2.0$ ,  $44.8 \pm 0.5$ , y  $47.6 \pm 0.7$  nm, correspondientes a las ZnO-Mg 0%, ZnO-Mg 2%, y ZnO-Mg 4%, respectivamente. Estos resultados confirman la condición nanométrica de las partículas. Los resultados obtenidos coinciden con Estrada-Urbina *et al.* (2018), quienes reportaron diámetros en el rango de 30 a 125 nm para las NPs ZnO. Es importante destacar el incremento en el tamaño de las NPs ZnO dado por el Mg. En este contexto, Pradeev *et al.* (2018) afirma que la incorporación de átomos de Mg en la red cristalina de ZnO puede alterar las interacciones entre las partículas, aumentando el tamaño de las NPs. La aglomeración se atribuye principalmente a la gran área superficial específica, así como a la alta energía superficial, propia de las NPs (Azam *et al.*, 2010).



**Figura 14.** Micrografías SEM e histogramas de tamaño de partícula, de NPs ZnO-Mg 0% (a, b), ZnO-Mg 2% (c, d), y ZnO-Mg 4% (e, f) respectivamente.

## 5.2. Prueba de germinación estándar.

Después del acondicionamiento osmótico de las semillas con las suspensiones de NPs, se determinó la humedad, y posteriormente, mediante un balance de materia en el que se tomó de referencia una muestra seca, se determinaron los microgramos ( $\mu\text{g}$ ) de NPs que se incorporaron a cada semilla tratada. Los datos se muestran en el Cuadro 5.

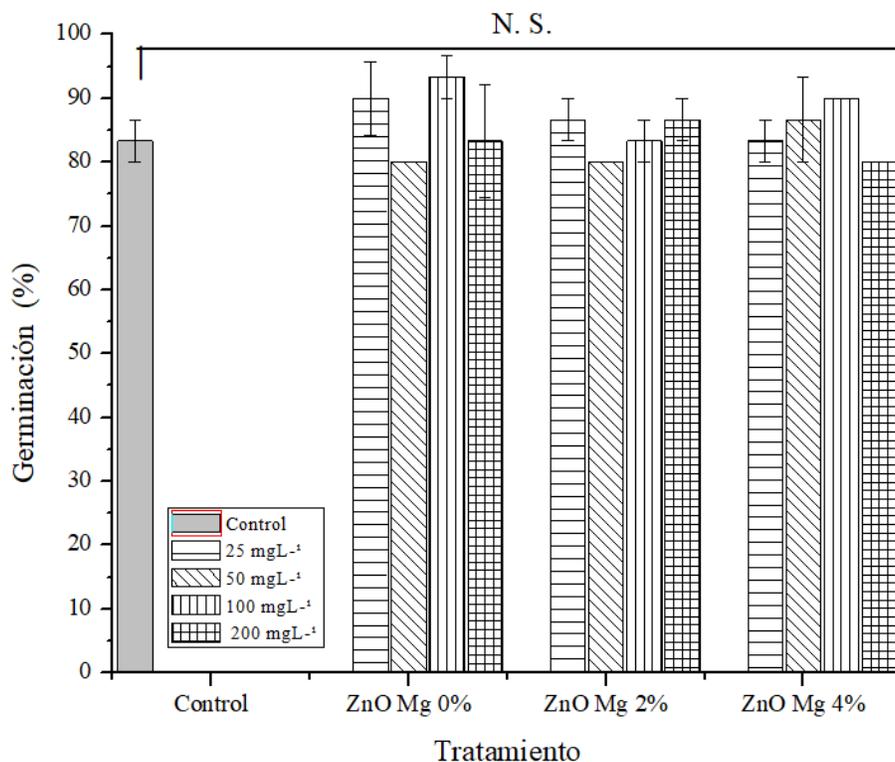
**Cuadro 5.** Cantidad de NPs ZnO y ZnO-Mg incorporadas en cada semilla de tomate.

Tratamiento	Concentración de NPs aplicada ( $\text{mgL}^{-1}$ )			
	25	50	100	200
ZnO-Mg 0%	0.015 $\mu\text{g}$	0.030 $\mu\text{g}$	0.062 $\mu\text{g}$	0.123 $\mu\text{g}$
ZnO-Mg 2%	0.016 $\mu\text{g}$	0.033 $\mu\text{g}$	0.067 $\mu\text{g}$	0.135 $\mu\text{g}$
ZnO-Mg 4%	0.019 $\mu\text{g}$	0.038 $\mu\text{g}$	0.077 $\mu\text{g}$	0.154 $\mu\text{g}$

En la prueba de germinación estándar realizada previa a la siembra de las semillas de tomate en las charolas, se encontraron los siguientes efectos al aplicar vía acondicionamiento osmótico los tratamientos de NPs de ZnO y ZnO-Mg.

- *Germinación*

En general, la germinación no presentó diferencia estadística significativa entre los tratamientos evaluados incluyendo el grupo control. Esto significa que, al aplicar las nanopartículas vía acondicionamiento osmótico, en cualquiera que sea su concentración o dopaje no se afectó significativamente la tasa de germinación (Figura 15).



**Figura 15.** Gráfica representativa a la prueba de medias en la variable de respuesta germinación.

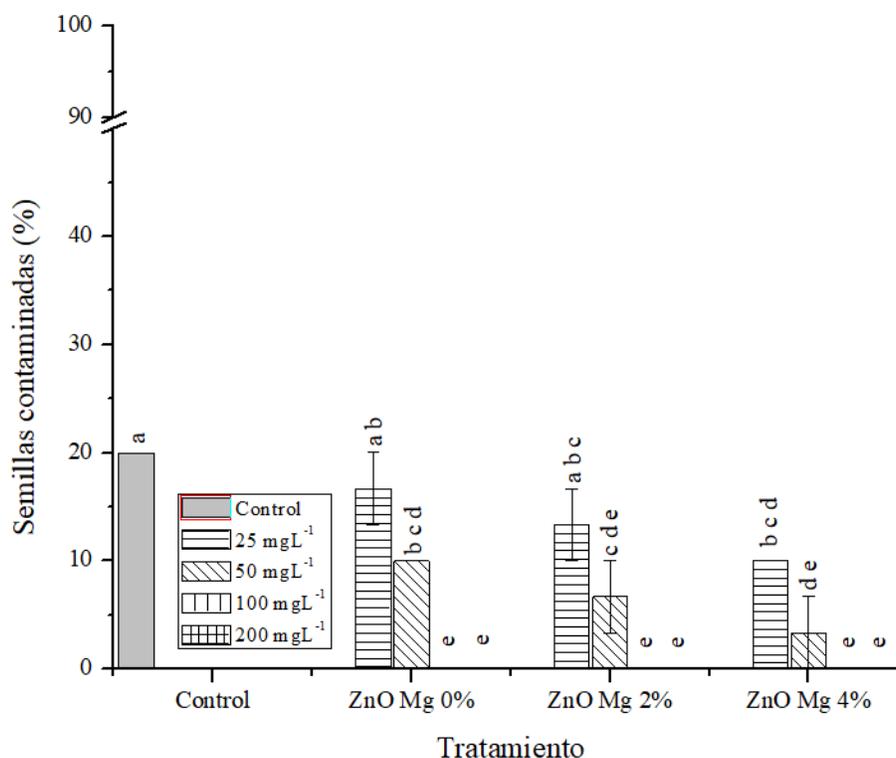
\*N.S.: No significativo.

A pesar de no existir diferencia estadística significativa, el tratamiento que obtuvo el mayor porcentaje de germinación fue el de ZnO-Mg 0% [100] (93%), señalando que este tratamiento obtuvo un 10% más de germinación respecto al grupo control. En general, en la mayoría de los tratamientos se encontró un rango promedio de germinación de 80-93%. Particularmente, no siempre se obtiene una mejora significativa en el porcentaje de germinación al aplicar NPs en las semillas. Uresti (2016) evaluó el porcentaje de germinación de la semilla de maíz al aplicar NPs de ZnO, TiO<sub>2</sub>, y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en concentraciones de 3 y 6 gL<sup>-1</sup>, y concluyó que ninguno de estos tratamientos logró afectar significativamente a esta variable. Por su parte, Flores (2020) encontró que al aplicar concentraciones superiores a 200 mgL<sup>-1</sup> de NPs ZnO en semillas de chile habanero, no generaba diferencias estadísticas significativas para esta variable. Estos resultados concuerdan con los aquí obtenidos.

- *Semillas contaminadas con microorganismos*

Respecto al total de semillas germinadas, se realizó un conteo de semilla con presencia de contaminación por fitopatógenos. En general, se observaron diferencias estadísticas entre el grupo

control y los grupos tratados con ZnO y ZnO-Mg en las concentraciones más altas evaluadas (100 y 200 mgL<sup>-1</sup>) (Figura 16). El grupo control presentó el mayor porcentaje de semilla contaminada (20%), mientras que los grupos tratados con ZnO y ZnO-Mg a concentraciones de 100 y 200 mgL<sup>-1</sup> no presentaron semillas contaminadas, este hecho obedece al efecto biocida propio del ZnO, que puede deberse a la generación de especies reactivas de oxígeno en el interior de la célula patógena (Vázquez *et al.*, 2020).



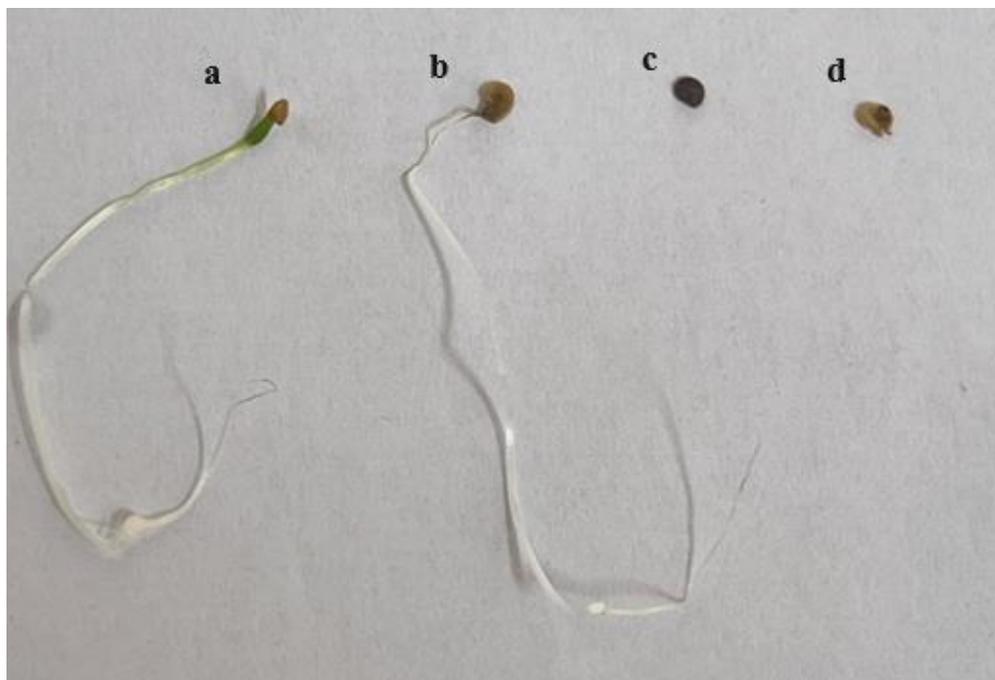
**Figura 16.** Gráfica representativa a la prueba de medias en la variable de respuesta semillas contaminadas con microorganismos.

\*Las medias que no comparten la misma letra, son estadísticamente diferentes (ANDEVA con  $p < 0.05$ ).

La Figura 16 muestra que, la contaminación decreció conforme aumentó la concentración de las NPs, obteniendo una contaminación de entre 18 y 3% para las concentraciones de 25 y 50 mgL<sup>-1</sup>, hasta llegar a las dosis más altas (100 y 200 mgL<sup>-1</sup>), donde la contaminación se inhibió en su totalidad. Además, se observó una tendencia similar entre los grupos de ZnO y ZnO-Mg, pues en el grupo con menor dopaje de Mg, se observó un porcentaje mayor de semillas contaminadas, conforme el porcentaje de Mg aumentó, la contaminación en las semillas se redujo, efecto que se

explica por la presencia de óxido de magnesio (MgO) originado de la misma síntesis de las NPs ZnO-Mg. Se ha reportado que el MgO presenta un efecto bactericida, debido a la unión del oxígeno superficial con las bacterias (Vázquez *et al.*, 2020), esto podría explicar por qué las semillas tratadas con las NPs ZnO dopadas con Mg presentaron menor porcentaje de contaminación, sumando al efecto antimicrobiano del ZnO.

Estada- Urbina *et al.*, (2018) evidenció el efecto antimicrobiano de las NPs ZnO en plántulas de maíz, alcanzando un 27% de contaminación menor en comparación con el grupo control. Sin embargo, se debe contemplar los efectos negativos que puede traer consigo la aplicación de NPs ZnO en concentraciones altas ( $> 200 \text{ mgL}^{-1}$ ) ya que se puede presentar toxicidad debido a la liberación de los iones de Zn, además, de generar un estrés provocado por la superficie, el tamaño o la forma de las nanopartículas (Flores, 2020). Estos efectos se vieron reflejados en la morfología de la semilla como se ilustra en la Figura 17.



**Figura 17.** Semilla con germinación adecuada (a), semilla con signos de toxicidad (b), semilla contaminada (c), semilla sin germinación (d).

Ayala *et al.*, (2024) menciona que una de las enfermedades más comunes en el tomate de cáscara es la marchitez, provocada por hongos filamentosos que tiene origen en el suelo; sin embargo, éste puede prevalecer en los frutos llegando a contaminar también a las semillas (Figura 18).



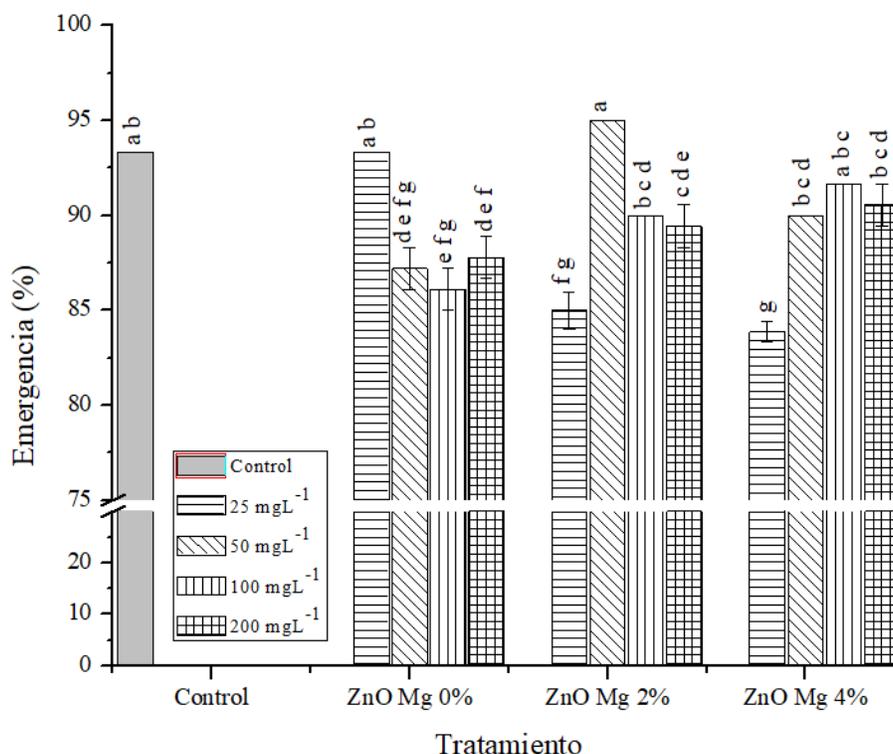
**Figura 18.** Ilustración de la contaminación de la semilla de tomate en los tratamientos: (a) Control, (b) ZnO-Mg 0% [25], (c) ZnO-Mg 2% [25], (d) ZnO-Mg 4% [25].

### 5.3. Efecto de las NPs en la calidad fisiológica de las plántulas.

Se evaluó la influencia de las diferentes concentraciones de NPs ZnO-Mg durante el crecimiento de la plántula, enfatizando en cada una de las siguientes variables relacionadas con el vigor de la plántula.

- *Emergencia*

Después de 30 días posteriores a la siembra, se realizó el conteo de plántulas emergidas. En general, se obtuvo un rango del 80 al 95% de emergencia, destacando el tratamiento ZnO-Mg 2% [50] que obtuvo el valor mayor (95%). Sin embargo, no se encontró diferencia estadística significativa respecto al tratamiento control el cual presentó un 93% de emergencia (Figura 19).



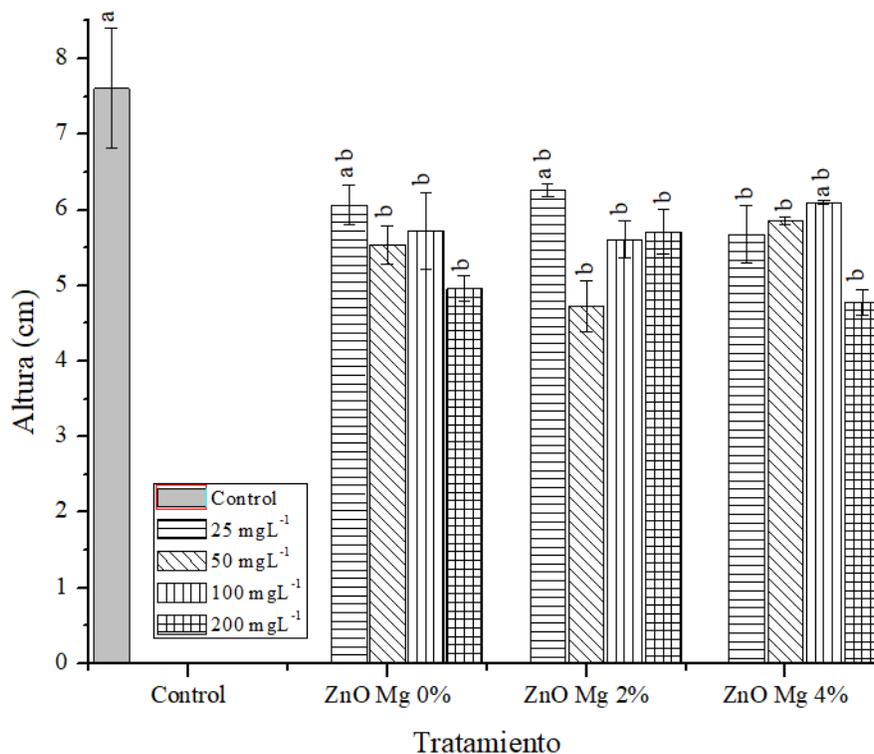
**Figura 19.** Gráfica representativa a la prueba de medias en la variable de respuesta emergencia.

\*Las medias que no comparten la misma letra, son estadísticamente diferentes (ANDEVA con  $p < 0.05$ ).

En comparación con la prueba de germinación estándar realizada previamente, el tratamiento ZnO-Mg 0% [100] se ubicó entre los porcentajes de emergencia promedio más bajos, lo que coincide con Pita & Pérez (1998) al sustentar que un buen porcentaje de germinación no asegura una alta tasa de emergencia. De hecho, no se observó ninguna tendencia en el comportamiento de los tratamientos.

- *Altura de la plántula*

El experimento mantuvo un rango de altura de plántula promedio de entre 4.5 a 8 cm, considerada desde el área basal del tallo hasta el ápice de la plántula (Figura 20). El análisis estadístico muestra una similitud estadística entre los tratamientos Control, ZnO-Mg 0% [25], ZnO-Mg 2% [25], y ZnO-Mg 4% [100], siendo el primero el que presentó la mayor altura (7.6 cm). El resto de los tratamientos fueron estadísticamente similares entre sí, manteniendo una altura promedio por debajo de los 6 cm (Figura 20).



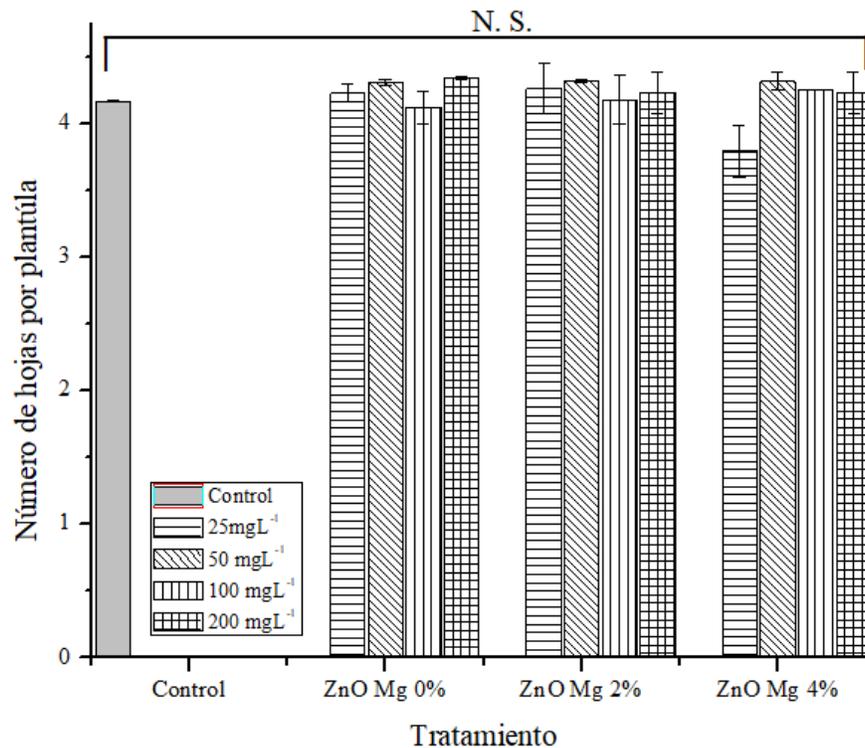
**Figura 20.** Gráfica representativa a la prueba de medias para la variable de respuesta altura de plántula.

\*Las medias que no comparten la misma letra, son estadísticamente diferentes (ANDEVA con  $p < 0.05$ ).

En la Figura 20 se observa que las plántulas dosificadas con  $200 \text{ mgL}^{-1}$  (exceptuando el tratamiento ZnO-Mg 2%) presentaron una altura promedio por debajo de los 5 cm, hecho que puede explicarse retomando lo descrito por Flores (2020), quien menciona que concentraciones mayores a  $200 \text{ mgL}^{-1}$  de ZnO nanoparticulado puede generar toxicidad en las plantas. Así, la toxicidad provocada por el exceso de Zn en las plantas se somatiza con un crecimiento reducido, pues el exceso de este elemento suele inhibir la fijación del  $\text{CO}_2$ , así como alterar la permeabilidad de la membrana celular (Casierra & Poveda, 2005). Sin embargo, este hecho no significa que obtener mayor altura sea un indicador positivo, tal fue el caso del tratamiento Control, pues una altura elevada en un estadio de crecimiento vegetativo inicial es casi siempre un signo de etiolación (Angulo, 2015), por lo que, los tratamientos con mejor respuesta en esta variable, son los tratados con concentraciones de  $100 \text{ mgL}^{-1}$  pues a pesar de no obtener diferencia estadística significativa, reflejan una tendencia creciente en tamaño, respecto a la concentración de  $50 \text{ mgL}^{-1}$ , sin rebasar la altura promedio de los 6 cm pero sin caer en tamaños inferiores a 5 cm.

- *Número de hojas*

El número de hojas no presentó diferencia estadísticamente significativa para todos los tratamientos incluyendo el control, dando un total de 3 a 4 hojas por plántula (Figura 21).



**Figura 21.** Gráfica representativa a la prueba de medias para la variable de respuesta número de hojas.

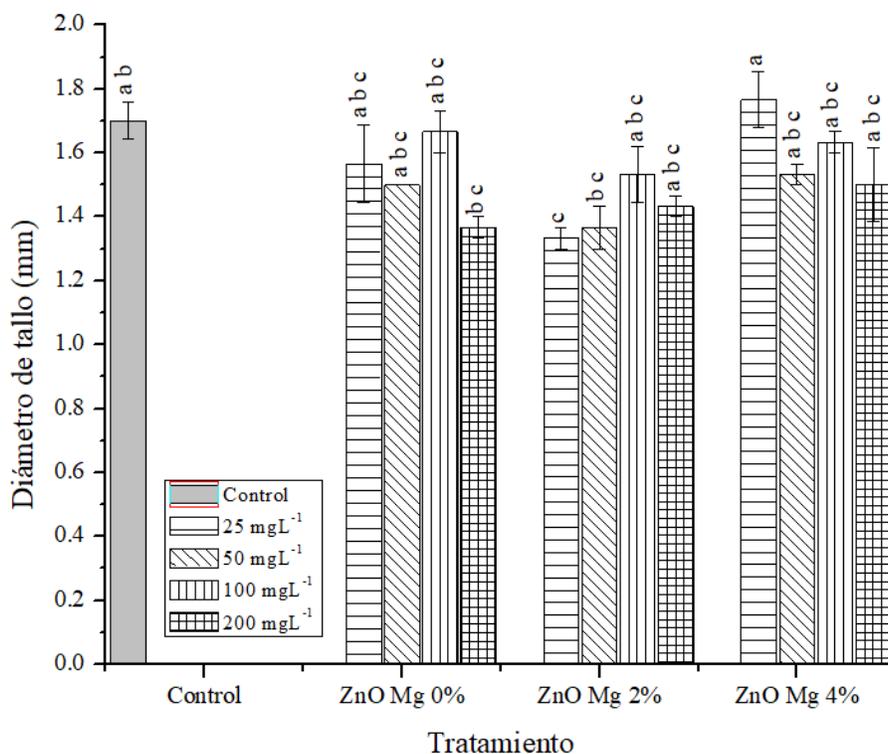
\* N.S.: No significativo.

En general, los resultados de esta variable son deseables, debido a que en las hojas es donde se encuentra el número mayor de cloroplastos, estructuras que sintetizan la clorofila, consecuentemente, una variación significativa en el número de hojas podría generar discrepancia en el contenido de clorofilas totales (Ruíz, 2019).

- *Diámetro del tallo*

Esta medición se realizó desde la base del tallo 1.5 cm hacia arriba. Los grupos experimentales presentaron un rango de diámetro del tallo de 1.2 a 2 mm. El análisis estadístico de la Figura 22 muestra que la mayoría de los tratamientos comparten al menos una letra en sus medias. Únicamente los tratamientos ZnO-Mg 0% [200], ZnO-Mg 2% [50], y ZnO-Mg 2% [25] mostraron

diferencia significativa respecto al tratamiento ZnO-Mg 4% [25], este último obtuvo la mejor respuesta al obtener un diámetro de tallo de 1.8 mm, por su parte, el tratamiento ZnO-Mg 2% [25] obtuvo 1.33 mm de diámetro, siendo el menor promedio.



**Figura 22.** Gráfica representativa a la prueba de medias para la variable de respuesta diámetro del tallo.

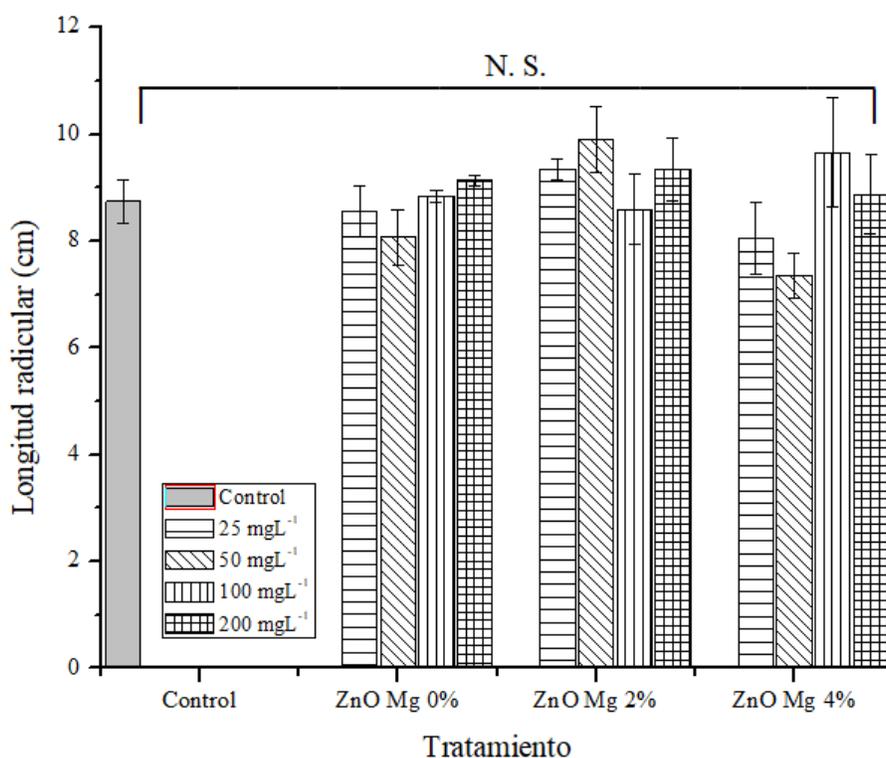
\*Las medias que no comparten una letra, son estadísticamente diferentes (ANDEVA con  $p < 0.05$ ).

En la gráfica anterior (Figura 22), se observa que el grupo de tratamientos de ZnO-Mg 4% presentó los valores más altos del diámetro del tallo respecto a los demás grupos experimentales (exceptuando la concentración de 100 mgL<sup>-1</sup>). Esta tendencia es similar a la ocurrida en la variable de altura de plántula, debido a que en la concentración de 100 mgL<sup>-1</sup> se registró el valor del diámetro del tallo más grande respecto a la concentración de 50 mgL<sup>-1</sup>, y posteriormente el diámetro decrece al llegar a la concentración de 200 mgL<sup>-1</sup>. Un tallo robusto y de diámetro amplio es un indicador de la calidad fisiológica en las plántulas, pues un tallo fuerte es menos sensible a los daños durante el transporte o a la plantación (Rodríguez, 2008) característica lograda por parte de las plántulas tratadas con ZnO-Mg 4%. Este efecto benéfico puede explicarse por la actividad

del Mg en la síntesis de proteínas y la movilización de nutrientes, acciones que aseguraron un crecimiento vegetal vigoroso y una mejor estructura celular reflejada en el grosor del tallo (Cakmak y Yaizici, 2010).

- *Longitud de la raíz*

En la variable de longitud de la raíz no se observó diferencia estadística significativa en todos los tratamientos evaluados, el promedio de la longitud de la raíz osciló entre 7 y 9 cm (Figura 23).



**Figura 23.** Gráfica representativa a la prueba de medias para la variable de respuesta longitud de raíz.

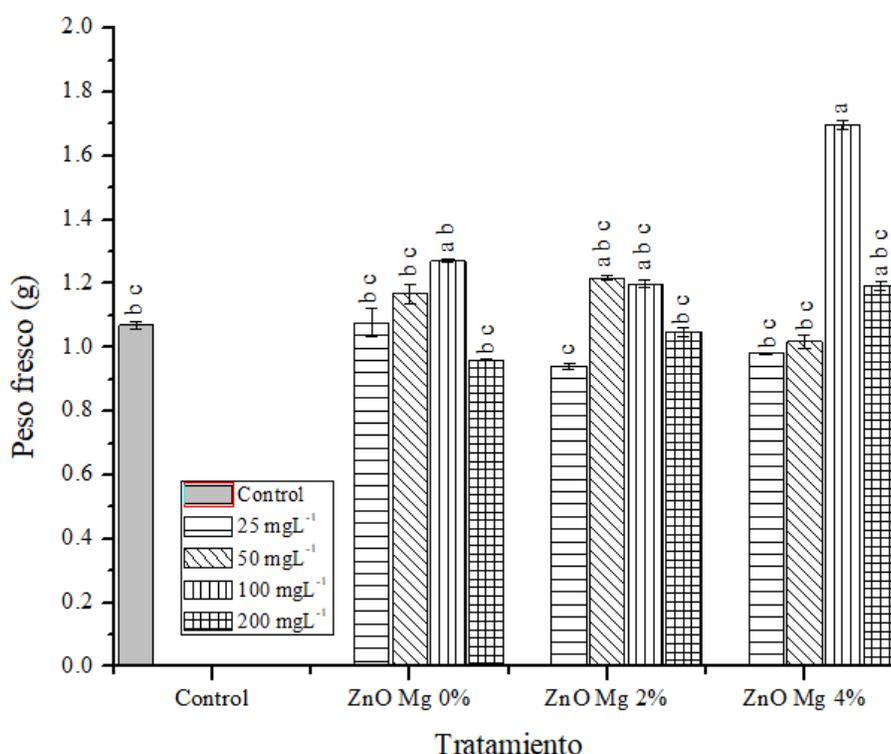
\* N.S.: No significativo.

A pesar de no presentarse diferencia estadística significativa, el tratamiento ZnO-Mg 2% [50] presentó una diferencia numérica de 1.1 cm respecto al tratamiento control (Figura 23). Además, se observó una tendencia creciente de longitud radicular en el tratamiento de ZnO-Mg 2%, el cual presentó valores más altos respecto a los demás grupos en las concentraciones de 25, 50, y 200 mgL<sup>-1</sup> (exceptuando la concentración de 100 mgL<sup>-1</sup> donde el valor más alto correspondió al grupo ZnO-Mg 4%). Estos hallazgos pudieron ser provocados por un crecimiento radicular que se expresó en los tratamientos que contenían Mg; lo cual concuerda con lo reportado por Cakmak &

Yazici, (2010) quienes demostraron que las plantas adecuadamente tratadas con Mg mostraban una acumulación de carbohidratos en las raíces, mientras que las deficientes de este elemento mostraban acumulación de carbohidratos en las hojas.

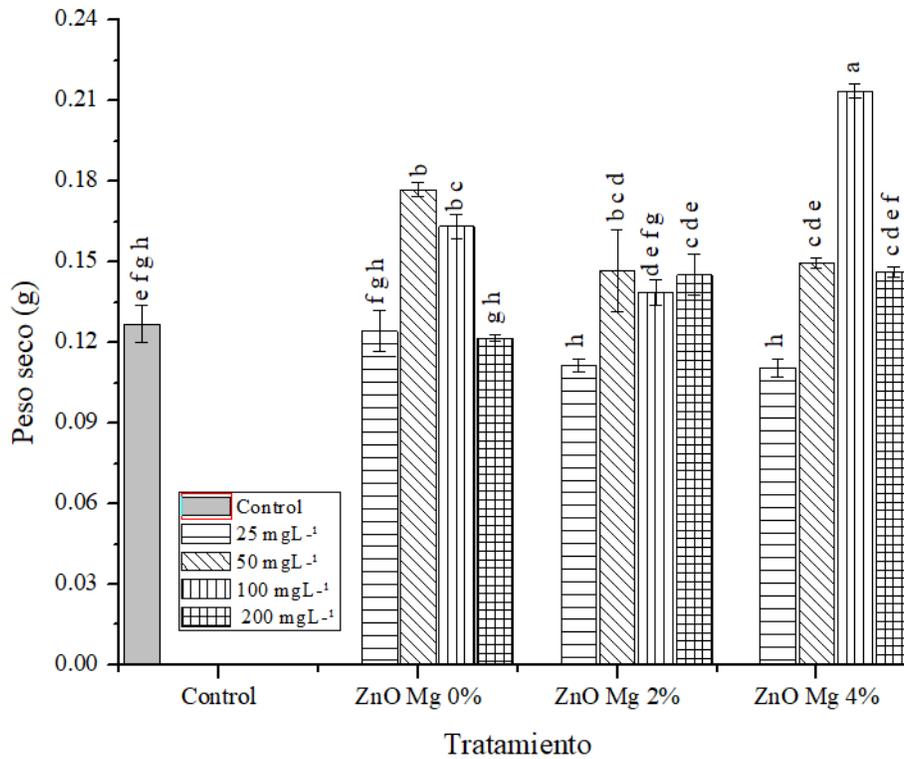
- *Contenido de materia seca*

En general, los tratamientos evaluados presentaron un rango de 0.9 a 1.8 g para peso fresco y un rango de 0.1 a 0.2 g para peso seco por plántula, sobresaliendo el tratamiento de ZnO-Mg 4% [100] que presentó el contenido más alto de materia fresca y seca (1.5 g y 0.213 respectivamente) respecto a los demás tratamientos (Figura 24 y Figura 25).



**Figura 24.** Gráfica representativa a la prueba de medias para la variable de respuesta peso fresco.

\*Las medias que no comparten la misma letra, son estadísticamente diferentes (ANDEVA con  $p < 0.05$ ).



**Figura 25.** Gráfica representativa a la prueba de medias para la variable de respuesta peso en seco.

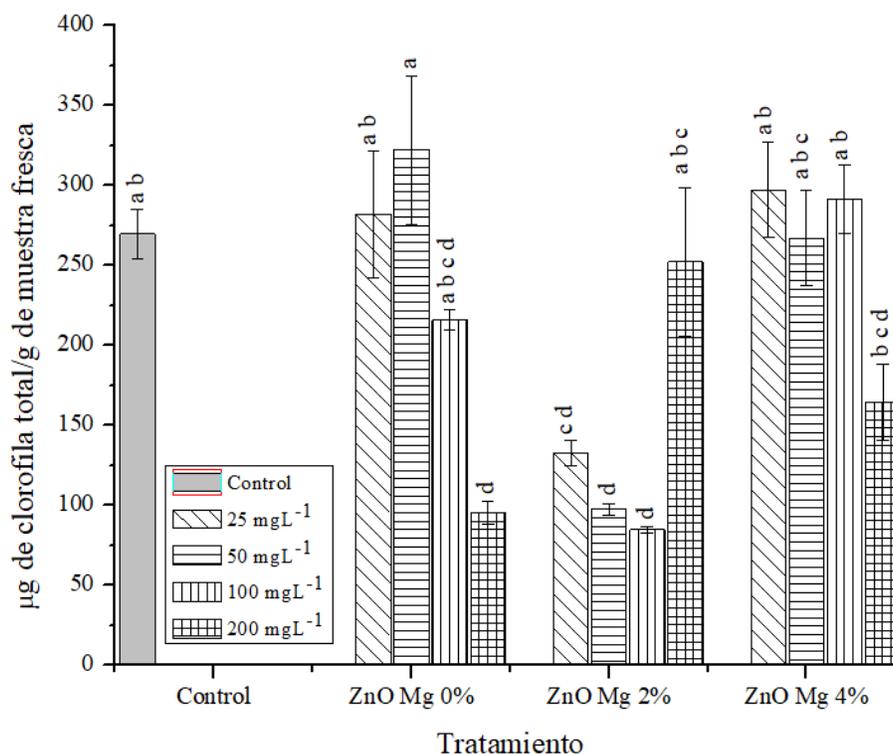
\*Las medias que no comparten la misma letra, son estadísticamente diferentes (ANDEVA con  $p < 0.05$ ).

Como se observa en la Figura 24 y Figura 25, el tratamiento ZnO-Mg 4% [100] obtuvo mayor peso en ambos casos, exceptuando éste, no se observan tendencias marcadas por las demás concentraciones o tratamientos de ZnO-Mg, debido a que las medias de los tratamientos varían según su peso en fresco o seco. Dicha variación se puede explicar por el ritmo de pérdida de agua ocurrido en el secado de las plántulas, y que está dado por la calidad estructural de la raíz, situación que comprometió al peso seco de la plántula (Giménez *et al.*, 2005). Un diámetro menor de tallo y una altura baja de plántula se traduce como una menor proporción de materia vegetal, misma que originará una correlación en el contenido de materia seca. Sin embargo, en el tratamiento Control, a pesar de que se obtuvieron valores relativamente altos en las variables señaladas, se registró un contenido bajo de materia fresca y seca respecto a ciertos tratamientos con NPs ZnO-Mg, situación que puede explicarse por una estimulación de crecimiento inducida por el zinc y el magnesio, pues al ser nutrientes esenciales en el crecimiento vegetativo de las plantas, éstos pueden

estimular procesos fisiológicos como la fotosíntesis y la síntesis de proteínas, hechos que contribuyeron a un mayor desarrollo de biomasa (Amezcuca & Lara, 2017).

- *Contenido de clorofilas totales*

La cuantificación de clorofilas totales (la suma de clorofila A y B) por el método espectrofotométrico, está expresado en microgramos de clorofila por cada gramo de muestra fresca ( $\mu\text{g/g}$ ). En el experimento se encontró un rango entre 84 y 323  $\mu\text{g}$  de clorofilas totales/g de muestra para los diferentes tratamientos, siendo ZnO-Mg 0% [50] el tratamiento con la media más alta (322.4), por arriba del tratamiento control y de sus similares con otros porcentajes de dopaje (Figura 26).



**Figura 26.** Gráfica representativa a la prueba de medias para la variable de respuesta contenido de clorofila total.

\*Las medias que no comparten la misma letra, son estadísticamente diferentes.

En general, el análisis estadístico muestra que, en la mayoría de los tratamientos, las diferencias entre las medias no son estadísticamente significativas (Figura 25). A pesar de que el tratamiento ZnO-Mg 0% [50] obtuvo el contenido más alto de clorofila (322.4  $\mu\text{g/g}$ ), compartió similitud estadística con los tratamientos Control, ZnO-Mg 0% [25], ZnO-Mg 0% [100], ZnO-Mg 2% [200], ZnO-Mg 4% [25], ZnO-Mg 4% [50], y ZnO-Mg 4% [100]. Por su parte, los tratamientos ZnO-Mg

0% [200], ZnO-Mg 2% [50], ZnO-Mg 2% [100] compartieron las medias más bajas ( $< 98 \mu\text{g/g}$ ) razón de su similitud estadística entre sí. A pesar de ésta similitud estadística entre los tratamientos, se apreció un comportamiento marcado por una gaussiana invertida, que comenzó en el tratamiento ZnO-Mg 0%, donde las concentraciones de 25 y  $50 \text{ mgL}^{-1}$  mostraron un alto contenido de clorofila, sobrepasando al del tratamiento control, y conforme aumentó la concentración a 100 y  $200 \text{ mgL}^{-1}$  el contenido fue disminuyendo, pasando al tratamiento ZnO-Mg 2%, que es donde se ubicaría el punto máximo de esta gaussiana inversa, los tratamientos se mantuvieron con un bajo contenido de clorofila que aumentó al llegar a la concentración de  $200 \text{ mgL}^{-1}$ , finalmente se mantuvieron los valores altos de clorofila para el tratamiento ZnO-Mg 4%, sobrepasando en las concentraciones de 25 y  $100 \text{ mgL}^{-1}$  al del tratamiento control, y volviendo a bajar considerablemente para la concentración de  $200 \text{ mgL}^{-1}$ . Este comportamiento puede explicarse por mecanismos relacionados con la interacción entre cada grupo de NPs y las plántulas; el tratamiento ZnO-Mg 0% actuó por su natural efecto del Zn, como un micronutriente esencial, facilitando la fotosíntesis y a su vez mejorando el contenido de clorofila al aplicarse en la concentración adecuada (Mostafa *et al.*, 2024); posteriormente el tratamiento ZnO-Mg 2% afectó en la disminución de la clorofila pues la adición de Mg en cantidades bajas, pudo provocar un efecto negativo, debido a la interferencia en la absorción de otros nutrientes (Cheng, *et al.*, 2020); finalmente, el tratamiento ZnO-Mg 4% tuvo un efecto positivo pues se alcanzó el umbral óptimo donde la cantidad de Mg fue suficiente para promover la actividad fotosintética, sin causar toxicidad en las dosis adecuadas, favoreciéndose por medio del Mg, como un componente clave en la síntesis de clorofila (Xiao, *et al.*, 2019). Las NPs ZnO-Mg pudieron modificar las propiedades electrónicas del ZnO al dosificar en concentraciones adecuadas; estas interacciones pudieron afectar la disponibilidad del Zn o del Mg en las plántulas, facilitando una mejor absorción y utilización de nutrientes que se vio reflejada en el contenido de clorofila de cada tratamiento (Pradeev, *et al.*, 2018).

## 6. CONCLUSIONES

- La caracterización por espectroscopia UV-Visible mostro el máximo de absorción característico de las NPs ZnO y ZnO-Mg que está ubicado en los 376 nm; mientras que la espectroscopia FTIR evidenció la formación del ZnO-Mg en los tres grupos, al mostrar un estiramiento metal-oxígeno cerca de los 360  $\text{cm}^{-1}$ ; así mismo la espectroscopia de fluorescencia indicó diferentes máximos de emisión característicos de las NPs ZnO y ZnO-Mg, caracterizados entre ellos por la interacción de excitones y vacantes de aniones en cada máximo de emisión.
- El análisis de carga superficial demostró la carga positiva de las NPs ZnO-Mg, así como su tendencia a la aglomeración; mientras que la distribución del tamaño reveló dos distribuciones de dimensión para cada grupo de NPs ZnO y ZnO Mg.
- Mediante la microscopia electrónica de barrido, se identificaron diámetros de partículas ubicadas alrededor de los 40 nm. Los métodos de caracterización demostraron una síntesis lograda de ZnO y ZnO-Mg nanoestructurado.
- El tratamiento de NPs ZnO sin dopaje de Mg, tuvo un efecto significativo en la germinación y en el contenido de clorofilas totales. Respecto a la calidad fisiológica, el grupo ZnO-Mg 2% presentó los promedios más altos en emergencia y longitud de la raíz.
- El grupo ZnO-Mg 4% generó la mayor altura de plántula, el mayor diámetro de tallo y el contenido más alto de materia seca, además de presentar una disminución significativa en el porcentaje de semilla contaminada por microorganismos.
- La dosis de NPs que presenta mejor efecto al ser aplicada en la semilla de tomate de cáscara es de 100  $\text{mgL}^{-1}$ . Esta dosis mejoró significativamente la calidad fisiológica y sanitaria de las plántulas, mostrando nula contaminación por microorganismos en la semilla. Esta concentración evidenció una tendencia creciente en la altura de la plántula, incrementó el valor del diámetro de tallo y generó el mayor contenido de materia seca.
- A pesar de no existir diferencias estadísticas significativas en algunas de las variables evaluadas, se pudieron observar comportamientos y tendencias de cada tratamiento, mismas que reforzaron la interpretación del efecto de las NPs ZnO-Mg sobre la calidad fisiológica y sanitaria de las plántulas.

## 7. RECOMENDACIONES

- Es aconsejable continuar con otras investigaciones para evaluar las mismas variables en una etapa más avanzada del cultivo de tomate de cáscara, y así mostrar la prevalencia o ausencia de los efectos dados por las NPs ZnO-Mg conforme el cultivo avance.
- La dosis recomendable de NPs es de  $100 \text{ mgL}^{-1}$  aplicados vía acondicionamiento osmótico en la semilla; sin embargo, valdría la pena realizar una aplicación del mismo tratamiento, esta vez por vía foliar, para contrastar los efectos del método de aplicación.
- Los tratamientos ZnO-Mg 0%, ZnO-Mg 2%, y ZnO-Mg 4% mostraron comportamientos distintos de acuerdo con cada variable evaluada. En futuras investigaciones, se recomienda utilizar adicionalmente tratamientos de ZnO-Mg con dopajes más elevados, como ZnO-Mg 6% o ZnO-Mg 8%, para fortalecer los comportamientos y tendencias aquí planteados.
- En la etapa de fructificación, es recomendable evaluar el rendimiento del tomate de cascara, así como su calidad fisiológica, calidad comercial, y de vida de anaquel, para mostrar los efectos de las NPs ZnO-Mg en el fruto.

## 8. LITERATURA CONSULTADA

- Alarcón, C. 2022 Análisis de la síntesis química y verde de nanopartículas de óxidos metálicos: ventajas y desventajas. [Tesis para obtener grado de maestro, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.]. Repositorio de tesis de Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1009/2408/1>.
- Álvarez, S., Torres, D., Querales, P., Valera, R., Pacheco, J. & Gavilán, T. 2021. Evaluación del efecto de la presencia de hongos patógenos y metabolitos secundarios sobre la germinación en tres hortalizas de hojas. *Revista Tecno Lógicas*. 24(50) e1730.
- Amezcu, J. & Lara, M. 2017. El zinc en las plantas. *Revista Comunicaciones Libres*. 68(3): 28-35.
- Angulo, F. 2015. Producción de almácigos de pepino y tomate en función del volumen de la celda y el medio de cultivo en Alajuela, Costa Rica. *Boletín Pro NAP*. 9(53): 2-19.
- Aranda-Barradas, M., Trejo-López, S., Del Real, A., Álvarez-Almazán, S., Méndez-Albores, A., García-Tovar, C., González-Díaz, F., & Miranda-Castro, S. 2022. Effect of molecular weight of chitosan on the physicochemical, morphological, and biological properties of polyplex nanoparticles intended for gene delivery. *Journal Carbohydrate Polymer Technologies and Applications* 4, 100228.
- Ayala, Q., Peinado, L., Beltrán, H., Tovar, J., Valenzuela, F. & Ruelas, J. 2024. Cultivares de tomatillo susceptibles a la marchitez en Sinaloa. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 15(1): e3143.
- Azam, A., Ahmed, F., Arshi, N., Chaman, M., Naqvi, A. 2010. Formación y caracterización de nanopulvos de ZnO sintetizados por el método sol-gel. *Revista de Aleaciones y Compuestos*. 496: 399–402.
- Bansi, D. & Azahar, M. 2018. Nanomaterials for biosensors: fundamentals and applications. En P. Dimitrios & G. Nikolelis. (Ed.) *Nanotechnology and Biosensors* (01 ed., vol. 54, pp. 21-74). Amsterdam, Netherlands.
- Batalla, J., Cuadros, M. & San Martín, E. 2014. Potencial zeta en la determinación de carga superficial de liposomas. *Latin American Journal of Physics Education*. 8(4): 4319.

- Bello-Bello, J. & Spinoso-Castillo, J. 2023. Utilización de nanopartículas de plata en la micropropagación de plantas. *Revista Mundo nano*. 16(30): 14e.
- Bennie, A. 1991. Growth and mechanical impedance. En Y. Waisel, A. Eshel & U. Kafkafi (Ed.) *Plant Roots the Hidden Half*, (p. 393-414) Marcel Dekker, Inc., New York.
- Botasini, S. 2021. Comparación del tamaño de nanopartículas de oro empleando diferentes técnicas y protocolos de medición. *Revista INNOTEC*. 21(02): 10-24.
- Cadenas, G. 2021. Síntesis de nanopartículas metálicas y estudio de sus aplicaciones. Departamento de Síntesis de Polímeros del Centro de Investigación en Química Aplicada. Recuperado el 14 de julio 2024, del sitio web: <https://ciqa.mx/NanoparticulasMetalicas.aspx>
- Cakmak & Yazici. 2010. Magnesium: Forgotten elements in crop production. *Journal Better Crops* 94(2): 23-25.
- Calle, G. 2010. Nanotecnología conceptos generales. *Revista de Información, Tecnología y Sociedad*. 5: 7-9.
- Carbajal, H. 2021. Modelo de sistema de recuperación de aguas grises por fotocatalisis solar con nanopartículas de TiO<sub>2</sub> para riego de cultivos. [Tesis doctoral de la de la Universidad Nacional del Centro del Perú] Repositorio de tesis Universidad Nacional del Centro del Perú. [https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/7008/T010\\_23709147\\_D](https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/7008/T010_23709147_D).
- Casierra, F. & Poveda, J. 2005. La toxicidad por exceso de Mn Y Zn disminuye la producción de materia seca, los pigmentos foliares y la claidad del fruto en fresa (*Fragaria sp.* Cv. Camarosa). *Revista Agronomía Colombiana*. 23(2): 283-29.
- Cheng, Y., Cheng, Y., Zheng, H., Song, Y., Li, R., Wan, F., & Li, J. 2020. Evaluation and Comparison of the Toxic Effects of MgO NPs, ZnO NPs,  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs,  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs, and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> NPs on the Remediation for Cadmium-Related Effects in Wheat Seedlings. *Journal Water, Air & Soil Pollution*. 231: 471.
- Ciriaco, G. 2024. Evaluación de la concentración y el tiempo de contacto de nanopartículas de SiO<sub>2</sub> en la desinfección fúngica de *B. cinerea Pers* en cultivos de maíz (*Zea mays*) contaminado por aguas residuales domésticas. [Tesis para obtener grado de maestro, Universidad Nacional

del Centro del Perú] Repositorio de tesis Universidad Nacional del Centro del Perú.  
[https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/10665/T010\\_45687503\\_M](https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/10665/T010_45687503_M).

Dirección de Planeación y Evaluación Municipal. 2012. Mapa de Cuautitlán Izcalli con división de Colonias sin nombres y límites territoriales. Recuperado el 24 de agosto del 2024 del sitio web:  
[https://isccc.global/files/custom/Community/249cuautitlan\\_izcallisp-form-a.pdf](https://isccc.global/files/custom/Community/249cuautitlan_izcallisp-form-a.pdf)

Doolette, C., Read, T., Li, C., Scheckel, K., Donner, E., Kopittke, P., Schjoerring, J. & Lombi, E. 2018. Foliar application of zinc sulphate and zinc EDTA to wheat leaves: differences in mobility, distribution, and speciation. *Journal of Experimental Botany*, 69 (18): 4469-4481.

Enríquez, J. 2021. Los abonos orgánicos: ventajas y desventajas en los cultivos hortícolas de la costa ecuatoriana. [Tesis para la obtención de título profesional, Universidad Técnica de Babahoyo]. Repositorio de tesis UTB. <https://space.utb.edu.ec/bitstream/handle/49000/9284/E-UTB>

Estrada-Urbina, J., Cruz-Alonso, A., Santander-González, M., Méndez-Albores, A. & Vázquez-Durán, A. 2018. Nanoscale Zinc Oxide Particles for Improving the Physiological and Sanitary Quality of a Mexican Landrace of Red Maize. *Journal Nanomaterials*. 8 (4): 247.

Estrada-Urbina, J., Villalobos-García, V., Méndez-Albores, A. & Vázquez-Durán, A. 2019. The effect of a relatively low dose of nano-ZnO particles on growth, chlorophyll content, grain yield, and yield components in a mexican landrace of red maize. *Journal Digest of Nanomaterials and Biostructures*. 14, 1169-1178.

Flores, J. 2020. Efecto de nanopartículas de óxido de zinc en la germinación y crecimiento temprano de plántulas de *Capsicum chinense*. [Tesis para obtener título profesional, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro] Repositorio de tesis UAAN. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/47668/K>.

Galindo-Guzmán, A., Fortis-Hernández, M., De la Rosa-Reta, C., Zermeño-González, H. & Galindo-Guzmán, M. Síntesis química de nanopartículas de óxido de zinc y su evaluación en plántulas de *Lactuca sativa*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 13(28): 3284.

Ganganagappa, N., Gowda, U., Patil, S., Adarakatti, P., Shastri, M., Yathish, K., Chalimeswamy, A. & Rangappa, D. 2017. Electrochemical heavy metal detection, photocatalytic,

photoluminescence, biodiesel production and antibacterial activities of Ag-ZnO nanomaterial. *Journal Materials Research Bulletin*. 94: 54-63.

García, J., Niño, G., Olivares, E., Lira, R., Díaz, E., Vázquez, R., Rodríguez, P. & Zavala, F. 2019. La aplicación foliar de nanopartículas de óxido de zinc y sulfato de zinc aumenta el contenido de compuestos bioactivos en chiles habaneros. *Revista Plants*. 8(8), 254.

García-López, J., Ruiz-Torres, N., Lira-Saldivar, R., Vera-Reyez, I. & Méndez-Arguello, B. 2016. Técnicas para evaluar germinación, vigor y calidad fisiológica de semillas sometidas a dosis de nanopartículas. 2º Minisimposio-Taller Agronano Tecnología. 129-140.

Giménez, C., Gallardo, M. & Thompson, R. 2005. Plant-Water Relations. En D. Hillel (Ed.) *Encyclopedia of Soils in the Environment* (1<sup>st</sup> ed., vol. 30, pp 231-238).

González, L., Ruíz, N. Velasco, J., García, J. 2023. Estudio del efecto de las nanopartículas de magnesio en parámetros fisiológicos de la germinación y en la acumulación de betacianinas en betabel. [Tesis para obtener título profesional, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro] Repositorio de tesis UAAN. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/49850/K>.

Google Earth, 2024. Software de consulta, recuperado el 25 de septiembre de 2024.

Gutiérrez, E., Gutiérrez, M. & Ortiz, C. 2015. Integrated nutrient management in intensive agricultural systems. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6: 201-215.

Ipohorski, M., & Bozzano, P. 2013. Microscopía electrónica de barrido en la caracterización de materiales. *Revista Ciencia e Investigación – Tomo*. 63(3): 43-53.

Jafar, A., Vijaya, P. & Karthikeyan, M. 2016. Synthesis structural and antibacterial properties of Mg doped ZnO nanoparticles. *Journal of Environmental Nanotechnology*. 5(2): 11-16.

Kumar, S., Boro, J., Ray, D., Mukherjee, A., & Dutta, J. 2019. Bionanocomposite films of agar incorporated with ZnO nanoparticles as an active packaging material for shelf-life extension of green grape. *Journal Heliyon*. 5: e01867.

- Lazcano, M., Sandoval, E., Tornero, M., Hernández, B., Ocampo, I., & Díaz, R. 2021. Evaluación de sustratos, solución nutritiva y enraizador en producción de plántulas de tomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 12. 2450.
- Lichtenthaler, H., & Wellburn, A. 1983. Determination of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Journal Biochemical Society*. 11(5): 591-592.
- Lira, R., Méndez, B., De los Santos, G., Vera, I. 2018. Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta universitaria*. 28(2): 9-24.
- López, M. 2022. El sistema de cultivo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa*): Caracterización, funcionamiento y alternativas, en Españita, Tlaxcala. [Tesis para obtener grado de maestro en ciencias, Universidad Autónoma Chapingo] Repositorio de tesis de COLPOS. [http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/handle/10521/4894/Lopez\\_Mendoza\\_ML\\_MC\\_Agroecologia\\_Sustentabilidad\\_2022.pdf](http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/handle/10521/4894/Lopez_Mendoza_ML_MC_Agroecologia_Sustentabilidad_2022.pdf).
- López-Patricio, Z. 2023. Expresión fenotípica de semillas de frijol tratadas con nanopartículas de óxido de zinc. [Tesis para la obtención de título profesional, Universidad Nacional Autónoma de Mexico] Repositorio institucional UNAM. <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000841806/3/0841806.pdf>
- Malvern Panalytical. 2024. Potencial zeta. Publicación en línea. Recuperado el 18 de agosto de 2024, del sitio web: <https://www.malvernpanalytical.com/es/products/measurement-type/zeta-potential>
- Mejia, A. & Pumaylle, L. 2021. Nanofertilizantes en la Producción de Cereales, una visión sostenible: Revisión Sistemática. [Tesis para la obtención de título profesional, Universidad César Vallejo] Repositorio UCV. [https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/84309/Mejia\\_CAC-Pumaylle](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/84309/Mejia_CAC-Pumaylle).
- Mendoza, G. & Rodríguez, J. 2007. La nanociencia y la nanotecnología: una revolución en curso. *Revista Perfiles Latinoamericanos*. 29: 161-186.
- Mendoza, S., 2018. Nanociencia y nanotecnología en carreras de ingeniería. *Revista Educación en Ingeniería*. 13(25): 177-122.

- Mengel, K., & Kirkby, E. 2000. Principios de nutrición vegetal. Cuarta edición. Basel, Suiza. 532-535.
- Moebs, W., Ling, S. & Sanny, F. 2021. Semiconductores y dopaje, Física de la Materia Condensada. Física Universitaria, (Vol.3). Texas, E.U.A.
- Molina, J. 2021. La Revolución Verde como Revolución Tecnocientífica: Artificialización de las Prácticas Agrícolas y sus Implicaciones. Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia. 21(42): 175-204.
- Mostafa, A., Día de Attia, M., Roquia, R., Mostafa, Z., Donia, A., Kincso, D., Gergo, P., & Zoltán, T. 2024. Influencia de las nanopartículas de óxido de zinc y el estrés salino en las características morfológicas y algunas bioquímicas de las plantas de *Solanum lycopersicum* L. Revista Plantas. 13(10): 1418.
- NAPPO. North American Plant Protection Organization. 2022. Normas Regionales de la NAPPO sobre medidas fitosanitarias (NRMF). Secretaría de la Organización Norteamericana de Protección a las Plantas.
- Navarrete, R., Aranda, S., Rodríguez, M., Moya, S., González, M. 2014. Bacterias Fitopatógenas en Semillas: Su Detección y Regulación. Revista Mexicana de Fitopatología. 32(2): 75-88.
- Ozin, G., Arsenault, A., Cademartiri, L. 2009. Nanochemistry: A Chemical Approach to Nanomaterials. 2a edición. Londres, Inglaterra.
- Pérez, H., López, F., Juárez, A., Méndez, A., Sarabia, C., García, S., Torres, A., Valle, J. & Pérez, A. 2024. Implicaciones de los nanomateriales utilizados en la agricultura: una revisión de literatura de los beneficios y riesgos para la sustentabilidad. Revisa Mundo Nano. 17(32): 1e-50e.
- Pita, J. & Pérez, F. 1998. Germinación de semillas. Hojas Divulgadoras. Madrid, España. 2-6.
- Pradeev, K., Sadaiyandi, K., Kennedy, A., Sagadevan, S., Zaman, Z., Mohd, R., Abdul, F., Rahman, F., Thamiz, S., & Rathina, R. 2018. Influence of Mg doping on ZnO nanoparticles for better photocatalytic evaluation and antibacterial analysis. Nanoescala Research Letters. 13:229.

- Pro NAP. Programa Nacional Sectorial de Producción Agrícola. 2011. Preparación de almácigos para hortalizas. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Costa Rica.
- Raja, P. & Barron, A. 2024. Estructura de la escala nano. Métodos Físicos en química y nano ciencia. Volumen 3. Física Universitaria. Rice University. Texas, E.U.A.
- Rasha, E., Monerah, A., Manal, A., Rehab, A., Mohammed, D. & Doaa, E. 2021. Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles from *Acacia nilotica L.* extract to overcome carbapenem-resistant *Klebsiella Pneumoniae*. Journal Molecules. 26:1919.
- Rivera, M., Ruíz, N. 2022. Estudio de la aplicación de nanopartículas de óxido de magnesio combinadas con ácido giberélico, sobre la germinación, el vigor y la acumulación de materia seca en maíz. [Tesis para la obtención de título profesional, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro] Repositorio UAAAN. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/48130/K>.
- Rivera, R., Preciado, P., Fortis, M., Betancourt, R., Yescas, P. & Orozco, J. 2021. Nanopartículas de óxido de zinc y su efecto en el rendimiento y calidad de melón. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 12(5): 791-803.
- Rodríguez, M. 2013. Bacterias transmitidas por semillas de hortalizas. Revista Mexicana de Fitopatología. 31(Suplemento): 73-75.
- Rodríguez, M. 2014. Normal climática de la estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli, México. [Tesis para la obtención de título profesional, Universidad Nacional Autónoma de México] Repositorio institucional UNAM. <http://132.248.9.195/ptd2014/agosto/0718352/0718352.pdf>
- Rodríguez, T. 2008. Indicadores de calidad de planta forestal. Mundi-Prensa. UACH-ANCF. México, D. F. 156.
- Rojas, K. & Ortuño, N. 2007. Evaluación de micorrizas arbusculares en interacción con abonos orgánicos como coadyuvantes del crecimiento en la producción hortícola del Valle Alto de Cochabamba, Bolivia. Revista Acta Nova. 3(4): 697-719.

- Ruiz, S., Ruiz, J., Hernández, J., García, R., Valadez, A. 2019. Extracción y cuantificación de clorofila en hojas comestibles del estado de Tabasco. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*. 4: 891-896.
- Sánchez-Carrillo, K. 2021. Estudio de la funcionalización de nanopartículas de oro con L-lisina mediante técnicas espectroscópicas, el potencial zeta y el análisis de seguimiento de nanopartículas (NTA). [Tesis para la obtención de título profesional, Universidad Nacional Autónoma de Mexico] Repositorio institucional UNAM. <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000813450/3/0813450.pdf>
- Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS). 2017. ¿Cómo se realiza un ensayo de germinación?. Publicación en línea, recuperado el 25 de octubre del 2024, del sitio web: <https://www.gob.mx/snics/articulos/como-se-realiza-un-ensayo-de-germinacion?idiom=es>
- Shakeel, A., Xiao, X., Long, W., Muhammad, S., Chen, M., & Wang, L. 2019. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research*. 6(9): 2026-2032.
- Sharma, M. & Jeevanandam, P. 2012. Magnesium doping in hierarchical ZnO nanostructures and studies on optical properties. *Journal Superlattices and Microstructures*. 52(6): 1083-1092.
- Soto, F. 2018. Parámetros de calidad de almácigos hortícolas. Universidad de Costa Rica. Recuperado el 14 de mayo de 2024, del sitio web: <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream>
- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. & Murphy, A. 2014. *Fisiología y Desarrollo de las plantas*. Sexta edición. Massachusetts, E.U.A.
- Thangadurai, D., Sangeetha, J., Prasad, R. 2020. *Nanotechnology for Food, Agriculture, and Environment*, Springer Cham. 405.
- Uresti, N. 2016. Efecto de nanopartículas de ZnO, TiO<sub>2</sub>, y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en el crecimiento y desarrollo del cultivo de maíz. [Tesis para obtener grado de Maestro. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio CINESTAV. <https://repositorio.cinvestav.mx/bitstream/handle/cinvestav/3806/SSIT0013834.pdf>.

- Vázquez, A., Vega, A. & Paz, B. 2020. Mecanosíntesis y efecto antimicrobiano de óxidos metálicos nanoestructurados. *Revista Mundo nano*. 11(21): 29-44.
- Wei, L., Yu, P., Chia, E. & Yang, S. 2012. The effect of cations on the aggregation of commercial ZnO nanoparticle suspension. *Journal of Nanoparticle Research*. 14:1259.
- Wien, H. C. 1997. Transplanting. En: *The Physiology of vegetable crops*. Wien (Ed). 37- 68. CAB International, Oxon UK.
- Xiao, L., Wang, S., Yang, D., Zou, Z., & Li, J. 2019. Physiological effects of MgO and ZnO nanoparticles on the citrus maxima. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater*. 34(1): 243-253.
- Zhañay, A. 2021. Síntesis de nanopartículas de óxido de magnesio con extractos de *Chamaemelum Nobile* para la obtención de biofertilizante. [Tesis para la obtención de título profesional. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]  
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/16729/1/96T00656.pdf>.