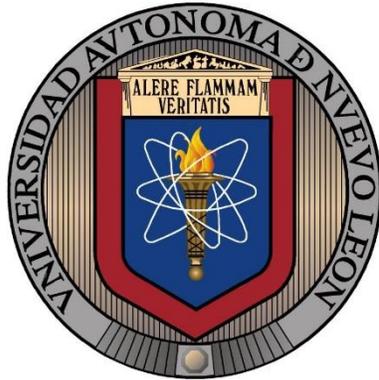


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**Evaluación de nanopartículas de zinc orgánicas e inorgánicas en pepino y  
tomate bajo condiciones de invernadero**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA**

**PRESENTA**

**KENEL MERZILUS**

**General Escobedo, N. L.**

**Octubre de 2023**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**Evaluación de nanopartículas de zinc orgánicas e inorgánicas en pepino y  
tomate bajo condiciones de invernadero**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA**

**PRESENTA**

**KENEL MERZILUS**

**General Escobedo, N. L.**

**Octubre de 2023**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE AGRONOMÍA**  
**SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**Evaluación de nanopartículas de zinc orgánicas e inorgánicas en pepino y  
tomate bajo condiciones de invernadero**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA**

**PRESENTA**

**KENEL MERZILUS**

**General Escobedo, N. L.**

**Octubre de 2023**

ESTA TESIS FUE REVISADA Y APROBADA POR EL  
COMITÉ PARTICULAR COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

COMITÉ PARTICULAR

---

Ph. D. Emilio Olivares Sáenz  
Director de Tesis

---

Dr. Josué Israel García López  
Co-Director

---

Ph. D. Rigoberto E. Vázquez Alvarado  
Asesor Auxiliar

---

Dr. Carlos Alberto Garza Alonso  
Asesor Auxiliar

---

Dr. Edgar Vladimir Gutiérrez-Castorena  
Asesor Auxiliar

---

Subdirector de Posgrado e Investigación  
Dra. Juanita Guadalupe Gutiérrez Soto

## DEDICATORIA

**A DIOS.** Por darme la vida, salud y por ser mi fortaleza a lo largo de ella, hoy concluyo una etapa más en mi vida, por sus infinitas bendiciones.

**A MI PAPA.** Eliquesne Merzilus por su interminable apoyo incondicional, por sus enseñanzas, consejos y por su eterna paciencia he logrado concluir mis estudios de Maestría, por estar siempre presentes en mi vida.

**A MI COMPAÑERA DE VIDA.** - Germithe Merzilus Dieujuste por su apoyo durante esta etapa de mi vida. Sin su apoyo y comprensión, nada hubiera sido posible. Les estaré eternamente agradecido.

**A MI TIO.** Wilbert Merzilus por su interminable apoyo incondicional, por sus consejos he logrado concluir mis estudios de Maestría, por estar siempre presentes en mi vida.

**A MI FAMILIA.** Bertrand Merzilus, Dania Merzilus, Elwood Merzilus, Estervenson Merzilus, Webster Ruben Merzilus, Chrisna Dieujuste y Ismael Dieujuste por brindarme su amor, apoyo y por estar siempre presentes.

**A MIS AMIGOS (AS).** Por brindarme su valiosa amistad, y por formar parte importante en mi vida.

## GRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por su apoyo económico, el cual hace posible mis estudios de posgrado.

A la **Facultad de Agronomía** de la **Universidad Autónoma de Nuevo León** por brindarme la oportunidad de continuar con mi preparación académica.

Al **Centro de Agricultura Protegida (CAP)** por la disponibilidad para realizar esta investigación.

Agradezco a mi director de **Ph. D. Emilio Olivares Sáenz**, por brindarme su apoyo, orientación, consejos y paciencia durante el transcurso de mis estudios, más sinceros agradecimientos.

A mis asesores **Dr. Josué Israel García López, Ph. D. Rigoberto E. Vázquez Alvarado, Dr. Carlos Alberto Garza Alonzo y Dr. Edgar Vladimir Gutiérrez-Castorena**, por su importante participación en el desarrollo de esta investigación.

A mi amigo **M.C. Mario James Forest** por su apoyo, amistad y por estar siempre presentes.

A mis **compañeros de generación** por su amistad, compañerismo, disponibilidad y apoyo durante el periodo de maestría.

A todos los que me brindaron su apoyo cuando lo necesité, aprecio mucho su tiempo invertido y su participación.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b> .....	<b>iv</b>
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ABREVIATURAS</b> .....	<b>xiv</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Hipótesis .....	6
1.1.1. Hipótesis general .....	6
1.2. Objetivos.....	6
1.2.1. Objetivo general.....	6
1.1.2. 1.2.2. Objetivos específicos .....	6
<b>2. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>7</b>
2.1. Origen y descripción del pepino .....	7
2.1.1. Descripción botánica .....	7
2.1.2. Aspectos agronómicos.....	8
2.1.3. Temperatura .....	8
2.1.4. Humedad .....	8
2.1.5. Luminosidad en el invernadero.....	9
2.1.6. Suelos.....	9
2.1.7. Importancia del cultivo .....	9
2.1.8. Variedades cultivadas en México .....	10
2.1.9. Sistema de siembra .....	10
2.1.10. Riego y drenaje.....	11
2.1.11. Fertilización .....	11
2.2. Invernadero .....	12
2.2.1. Producción de pepino en invernadero .....	12

2.2.2. Cultivo en invernadero .....	14
2.2.3. Sistema de producción .....	14
2.2.4. Humedad relativa .....	14
2.2.5. Superficie destinada al pepino en invernaderos .....	15
2.2.6. Sistema de siembra y exportación .....	15
2.2.7. Cosecha.....	16
2.3. Nanopartículas (NPs) .....	17
2.3.1. Importancia de las nanopartículas .....	17
2.3.2. Nanopartículas en agricultura .....	18
2.3.3. Nanopartículas de zinc en horticultura.....	19
2.3.4. Nanopartículas orgánicas sintetizadas de moringa .....	19
2.4. Zinc (Zn) .....	21
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>22</b>
3.1. Ubicación de los Experimentos .....	22
3.1.1. Características de los invernaderos.....	22
3.2. Diseño experimental.....	23
3.3. Experimento 1. Pepino .....	26
3.3.1. Material vegetal.....	26
3.3.2. Producción de plántulas .....	26
3.3.3. Establecimiento del cultivo de pepino.....	27
3.3.4. Preparación del suelo .....	27
3.3.5. Características del agua utilizada en la solución nutritiva.....	28
3.3.6. Riego y fertirriego .....	28
3.3.7. Trasplante.....	29
3.3.8. Preparación de las nanopartículas .....	30
3.3.9. Aplicación de los tratamientos .....	30
3.3.10. Cosecha.....	31
3.3.11. Variables evaluadas .....	31
3.3.12. Descripción de las variables evaluadas.....	32

3.3.12.1. Altura de la planta (cm).....	32
3.3.12.2. Días a la floración.....	32
3.3.12.3. Diámetro del tallo (mm) .....	32
3.3.12.4. Número de frutas por plantas .....	32
3.3.12.5. Longitud del fruto (cm).....	33
3.3.12.7. Peso de fruto (g).....	33
3.3.12.8. Rendimiento .....	33
3.3.13. Análisis foliar en el cultivo de pepino .....	34
3.3.13.1. Análisis de nitrógeno (N).....	36
3.3.13.2. Digestión .....	36
3.3.13.3. Destilación.....	37
3.3.13.4. Titulación.....	37
3.3.13.5. Análisis de fósforo (P) .....	38
3.3.13.6. Los análisis de K, Ca, Mg y Zn.....	39
3.4. Experimento 2. Tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.) .....	40
3.4.1. Material vegetal.....	40
3.4.2. Producción de plántulas.....	40
3.4.3. Preparación del suelo .....	40
3.4.4. Establecimiento del cultivo.....	41
3.4.5. Trasplante y aplicación de los tratamientos .....	41
3.4.6. Fertirriego .....	42
3.4.7. Aplicación de nanopartículas .....	42
3.4.8. Cosecha .....	43
3.4.9. Variables evaluadas.....	43
3.4.9.1. Altura de la planta.....	43
3.4.9.2. Diámetro del tallo .....	43
3.4.9.3. Peso del fruto.....	44
3.4.9.4. Diámetro polar de fruto (mm) .....	44

3.4.9.5. Diámetro ecuatorial de fruto (mm) .....	44
3.4.9.6. Rendimiento.....	44
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>45</b>
4.1. Experimento1. ....	45
4.1.1 Altura de la planta .....	45
4.1.2. Diámetro del tallo.....	48
4.1.3. Diámetro de tallo para los tipos de fertilizantes dentro de cada dosis....	48
4.1.4. Diámetro de tallo considerando los 10 tratamientos .....	50
4.1.5. Días a floración.....	50
4.1.6. Número de frutos y peso del fruto.....	51
4.1.7. Diámetro del fruto .....	54
4.1.8. Longitud del fruto .....	56
4.1.9. Peso fresco y seco del tallo .....	57
4.1.10. Peso seco del tallo.....	58
4.1.11. Peso fresco y seco de las hojas .....	59
4.1.12. Peso fresco y seco de raíces.....	60
4.1.13. Análisis de nutrientes en las hojas de pepino .....	62
4.1.13.1. Nitrógeno (N).....	62
4.1.13.2. Fosforo (P) .....	63
4.1.13.3. Potasio (K) .....	63
4.1.13.4. Magnesio (Mg) .....	64
4.1.13.5. Calcio (Ca) .....	65
4.1.13.6. Zinc (Zn).....	66
4.1.14. Grado °Brix .....	66
4.1.15. Rendimiento.....	68
4.2. Experimento 2. Tomate .....	70
4.2.1. Altura de la planta .....	70
4.2.2. Diámetro del tallo.....	71
4.2.3. Peso de fruto .....	72
4.2.5. Diámetro ecuatorial de fruto.....	74
4.2.6. Rendimiento.....	75

<b>5. CONCLUSIONES</b> .....	77
<b>6. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	78
<b>7. ANEXO</b> .....	91

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Tratamientos evaluados en los experimentos.....	26
2	Características del análisis del agua utilizada en la preparación de la solución nutritiva.....	29
3	Fertilizantes utilizados en la preparación de 450 L de solución nutritiva.	30
4	Nanopartículas y dosis aplicadas en el experimento.....	31
5	Caracterización del agua de pozo utilizada en la preparación de la solución nutritiva.....	43
6	Comparación de medias de dosis dentro de fertilizantes para incremento de altura de pepino ( <i>Cucumis sativus</i> L.) "Poinsett 76" .....	47
7	Comparación de medias de fertilizantes dentro de dosis para incremento de altura de pepino ( <i>Cucumis sativus</i> L.) "Poinsett 76.....	48
8	Comparación de medias de dosis para el diámetro de tallo de pepino ( <i>Cucumis sativus</i> L.) "Poinsett 76.....	49
9	Comparación de medias de diámetro de tallo para los tipos de fertilizantes dentro de cada dosis.....	50
10	Comparación de medias del diámetro de pepino ( <i>Cucumis sativus</i> L.) "Poinsett 76 considerando los 10 tratamientos.....	51

11	Medias de días a floración de pepino ( <i>Cucumis sativus</i> L.) “Poinsett 76”.	52
12	Comparación de medias de peso de fruto de pepino ( <i>Cucumis sativus</i> L.) “Poinsett 76” .....	53
13	Comparación de medias de PF+NFs de pepino ( <i>Cucumis sativus</i> L.) “Poinsett 76” .....	54
14	Comparación de media del diámetro de fruto de pepino ( <i>Cucumis sativus</i> L.) “Poinsett 76” dentro de los tratamientos.....	55
15	Comparación de media de la longitud del fruto de pepino ( <i>Cucumis sativus</i> L.) “Poinsett 76” dentro de los tratamientos.....	57
16	Comparación de media para el peso fresco del tallo de pepino ( <i>Cucumis sativus</i> L.) “Poinsett 76” .....	58
17	Comparación de medias para el peso seco del tallo de pepino ( <i>Cucumis sativus</i> L.) “Poinsett 76” .....	59
18	Medias del peso fresco de las hojas de pepino ( <i>Cucumis sativus</i> L.) “Poinsett 76” .....	60
19	Medias del peso seco de las hojas de pepino ( <i>Cucumis sativus</i> L.) “Poinsett 76” .....	61
20	Peso fresco y seco de la raíz de pepino ( <i>Cucumis sativus</i> L.) “Poinsett 76” .....	62
21	Comparación de medias de concentración foliar de N para nanopartículas de diferentes dosis.....	63

22	Concentración foliar de P para tratamientos.....	64
23	Medias de concentración foliar de K para nanopartículas con diferentes dosis.....	65
24	Medias de concentración foliar de Mg para nanopartículas con diferentes dosis. ....	65
25	Comparación de medias de concentración foliar de Ca para nanopartículas de diferentes fertilizantes.....	66
26	Análisis de varianza (ANVA) de la concentración foliar de Calcio (Ca)...	66
27	Comparación de medias de concentración foliar de Zn para nanopartículas de diferentes dosis.....	67
28	Comparación de medias de grado °Brix en la fruta de pepino.....	68
29	Análisis de varianza (ANVA) para el grado Brix en el fruto de pepino.....	68
30	Comparación de medias de peso individual de frutos de pepino aplicando diferentes dosis de nanopartículas de ZnO bajo condición invernadero.....	69
31	Rendimiento de pepino aplicando diferentes dosis de nanopartículas de ZnO bajo condición invernadero.....	70
32	Medias de altura de tomate en tratamientos de nanopartículas con diferentes dosis.....	72

33	Comparación de medias para el diámetro de tallo de tomate.....	73
34	Comparación de medias de peso fruto de tomate para nanopartículas de diferentes dosis.....	74
35	Medias del diámetro polar de fruto para nanopartículas en diferentes dosis.....	75
36	Medias de diámetro fruto para nanopartículas de diferentes dosis.....	75
37	Comparación de medias de rendimiento de tomate para nanopartículas en diferentes dosis.....	77
38	Comparación de medias de rendimiento de tomate para nanopartículas de diferentes fertilizantes.....	77

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
1	Campus de Ciencias Agropecuarias en el municipio de Gral. Escobedo, N.L. (INEGI, 2020).....	22
2	Invernadero Gótico de investigación del CAP en el municipio de Gral. Escobedo, N.L.....	23
3	Mapa del diseño experimental en el invernadero gótico del CAP (FAUANL).....	25
4	Producción de plántulas en charolas de propagación de poliestireno de 32 cavidades.....	28
5	Aplicación de NPs de ZnO daño por toxicidad en la dosis de 500 ppm.....	32

## ABREVIATURAS

<b>ADN</b>	Ácido Desoxirribonucleico
<b>ANOVA</b>	Análisis de Varianza
<b>ARN</b>	Ácido Ribonucleico
<b>CAP</b>	Centro de Agricultura Protegida
<b>CONACYT</b>	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
<b>FAO</b>	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
<b>FAOSTAT</b>	Base de Datos Estadísticos Corporativos de la Organización para la Agricultura y la Alimentación.
<b>FA-UANL</b>	Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma Nuevo León
<b>INIFAP</b>	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
<b>NT</b>	Nanotecnología.
<b>NPs</b>	Nanopartículas
<b>pH</b>	Potencial de Hidrogeno
<b>SIAP</b>	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera.
<b>SPSS</b>	Statistical Package for the Social Sciences (Paquete Estadístico para las Ciencias Sociales).
<b>UE</b>	Unidad experimental

## RESUMEN

El pepino (*Cucumis sativus* L.) es una hortaliza que muestra un gran potencial económico debido a la superficie cultivada y al consumo nacional y mundial. Se trata de una planta cultivada de relevancia económica en México, destacando por su valioso aporte nutricional gracias a su elevado contenido de proteínas, minerales y vitaminas, la cual puede ser consumida en forma fresca o procesada industrialmente. El objetivo del experimento fue evaluar diferentes dosis de nanopartículas de ZnO orgánicas (sintetizadas de moringa) e inorgánicas, comparadas con fertilización química ( $ZnSO_4$ ) en el cultivo de pepino en un ambiente de invernadero. La aplicación de las nanopartículas se realizó de manera foliar con dosis de 100, 300 y 500 ppm, por triplicado y se utilizó sustrato (perlita) con aplicaciones de solución nutritiva. Se llevaron a cabo evaluaciones de las variables: diámetro de tallo, altura de la planta, días a floración, número de frutos por planta, diámetro longitudinal, ecuatorial y peso de frutos, así como el rendimiento total por unidad experimental. Además, se realizaron mediciones de las cantidades de N, P, K, Ca, Mg y Zn presentes en las hojas. Los resultados mostraron que los mayores rendimientos de pepino se encontraron en los tratamientos de NPs de Zn inorgánicas en dosis de 500 ppm y NPs de Zn orgánicas en dosis de 100 ppm. Se registraron los rendimientos más altos en el cultivo de tomate al emplear tratamientos que incluían nanopartículas orgánicas a concentraciones de 100 ppm y 300 ppm.

**Palabras clave:** ZnO, *Cucumis sativus* L, Concentración nutrimental, *Solanum lycopersicum* L.

## ABSTRACT

Cucumber (*Cucumis sativus* L.) is a vegetable that shows great economic potential due to its cultivated area and national and world consumption. It is a cultivated plant of economic relevance in Mexico, standing out for its valuable nutritional contribution due to its high content of proteins, minerals and vitamins, which can be consumed fresh or industrially processed. The objective of the experiment was to evaluate different doses of organic (synthesized from moringa) and inorganic ZnO nanoparticles, compared with chemical fertilization ( $\text{ZnSO}_4$ ) in cucumber cultivation in a greenhouse environment. The nanoparticles were applied foliarly with doses of 100, 300 and 500 ppm, in triplicate, and substrate (perlite) was used with applications of nutrient solution. The following variables were evaluated: stem diameter, plant height, days to flowering, number of fruits per plant, longitudinal and equatorial diameter and fruit weight, as well as total yield per experimental unit. In addition, measurements were made of the amounts of N, P, K, Ca, Mg and Zn present in the leaves. The results showed that the highest cucumber yields were found in the treatments of inorganic Zn NPs at a dose of 500 ppm and organic Zn NPs at a dose of 100 ppm. The highest yields were recorded in the tomato crop when using treatments that included organic nanoparticles at concentrations of 100 ppm and 300 ppm.

**Key words:** ZnO, *Cucumis sativus* L., Nutrient concentration, *Solanum lycopersicum* L.

## 1. INTRODUCCIÓN

El pepino (*Cucumis sativus* L.) es una hortaliza que posee un significativo potencial económico debido a la superficie donde se cultiva y su consumo (Grijalva *et al.*, 2011); Además, es una de las plantas más relevantes en la alimentación de los seres humanos, el elevado índice de consumo se debe a que contiene minerales, proteínas y vitaminas se encuentran presentes en él, y puede ser ingerido tanto en su estado fresco como en su forma procesada industrialmente (FAO, 2018). En México, es una de las hortalizas más importantes que se cultivan, tanto por el aprovechamiento de la superficie donde se cultiva como por la producción obtenida (SIAP, 2017). En la actualidad, la cantidad de pepino demandada a nivel internacional es mayor que la ofertada, motivo por el cual los precios son atractivos para su exportación (SIAP, 2019).

En 2019, la producción mundial de pepino alcanzó un total de 88,616,692 toneladas (ton), cultivadas en una superficie de 2,144,672 hectáreas (ha), logrando un rendimiento promedio de 38 ton ha<sup>-1</sup>. La mayor parte de esta producción, representando el 90%, se concentra en diez naciones. Estos países son China, que lidera con un 77% de la producción mundial, seguida de Rusia (2%), Turquía (2%), Irán (2%), Ucrania (1%), Uzbekistán (1%), México (1%), Estados Unidos de América (1%), España (1%) y Japón (1%). A pesar de que China aporta más del 50% de la

producción mundial, sus rendimientos por hectárea son relativamente bajos, alcanzando las 54 ton ha<sup>-1</sup>. En contraste, los Países Bajos lideran en términos de rendimiento con 685 ton ha<sup>-1</sup> (FAOSTAT, 2020).

En la agricultura moderna se utilizan una gran cantidad de productos químicos con el propósito de aumentar la productividad de los cultivos, los cuales pueden ser peligrosos, al medio ambiente y productores (Shalaby *et al.*, 2016). Así que, una alternativa para promover una agricultura sostenible podría ser la utilización de productos en nanoescala (Hernandez-Viezcas *et al.*, 2013). La aplicación de la nanotecnología en el sector agrícola se utiliza como herramienta de diagnóstico de enfermedades, a través de la administración precisa de moléculas beneficiosas y la mejora de los envases, se busca asegurar una mayor vida útil de los alimentos sin comprometer sus propiedades organolépticas y su seguridad sanitaria (Tomlinson, 2013).

El mercado de las hortalizas sigue siendo más exigente en cuanto a la calidad, puesto que únicamente el 5.0% de estas se venden a nivel mundial (Vasco Morcillo, 2015). El ingreso a los mercados internacionales es de suma importancia para las naciones que cultivan hortalizas para su exportación, como es el caso de México (Sandí-Mendoza, 2016). Gracias a los avances tecnológicos, se ha observado un aumento en la construcción de invernaderos en la agricultura, lo que ha contribuido al incremento de la producción de pepinos. Este sistema de producción ofrece la posibilidad de ajustar las condiciones climáticas y el ciclo del cultivo, así como de mitigar los efectos

adversos que provienen de condiciones ambientales como lluvias, vientos, heladas o plagas (Agricultureros, 2018). Los rendimientos por área de cultivo en invernadero son mayores en comparación con los obtenidos en campos abierto, debido a las condiciones ambientales dentro de los invernaderos por fluctuar temperaturas moderadas, cambio de aire y control de incidencia de plagas (FAO, 2020).

Los estados que destacan como principales productores de esta hortaliza son Sinaloa, Michoacán, Sonora y Morelos, donde fue establecida en 2019 la superficie de 16,200 ha, de las cuales se obtuvo una producción estimada en 826,402 toneladas, generando una derrama económica por su comercialización de 5, 496,036 de pesos moneda nacional (SIAP, 2019). La producción pepino en medios protegidos se ha transformado en una alternativa viable para numerosos agricultores. La utilización de invernaderos y diversas técnicas de resguardo de las plantas proporciona ventajas que simplifican la producción en áreas no convencionales, posibilitando su cultivo durante todo el año (López-Elías *et al.*, 2015; Sandí-Mendoza *et al.*, 2016).

Por definición, las nanopartículas son partículas atómicas o moleculares que tienen al menos una dimensión que oscila entre 1 y 100 nanómetros (nm) (Singh *et al.*, 2021). Las nanopartículas (NPs) han suscitado un gran interés debido a su capacidad para mejorar la calidad y prolongar la vida útil de los productos mediante diversas aplicaciones (Nuruzzaman *et al.*, 2016). Además, despiertan interés en la creación de productos destinados a la agricultura, ofreciendo una oportunidad destacada para la aplicación de agroquímicos sintéticos con el potencial de disminuir su impacto

ambiental (Razzaq *et al.*, 2016). La nanotecnología también tiene la capacidad de transformar los sistemas relacionados con la agricultura y la alimentación al mejorar la gestión del agua, brindar protección contra plagas y enfermedades, y ofrecer herramientas avanzadas en campos como la biología molecular y celular. Además, contribuye a la creación de nuevos materiales para la detección y preservación del medio ambiente (Kurwadkar *et al.*, 2015).

Las investigaciones sobre nanopartículas en plantas se centran en los impactos beneficiosos que tienen en el proceso de crecimiento (García-Gómez *et al.*, 2017). La aplicación responsable de la nanotecnología puede contribuir a garantizar la seguridad alimentaria al aumentar la producción en la agricultura primaria, ya que su efecto principal radica en mejorar el crecimiento de las plantas y el rendimiento de las cosechas (Razzaq *et al.*, 2016). Las nanopartículas (NPs) posibilitan un aumento en la absorción de agua y micronutrientes, lo que acelera la descomposición de las reservas y favorece las etapas iniciales del proceso de germinación (Corral-Díaz *et al.*, 2014).

Dubey y Mailapalli (2016) se indicaron que las semillas tratadas con nanopartículas de ZnO mostraron una mejora en la germinación y el crecimiento de las plántulas de pepino. Además, se observó un aumento en el porcentaje de plántulas normales debido a un incremento en la tasa de germinación, estos datos fueron obtenidos entre 7 y 14 días después de la siembra. Para comprender las posibles ventajas de incorporar la nanotecnología en la agricultura, uno de los primeros pasos es evaluar cómo las nanopartículas afectan a las semillas y a las plantas (López-Vargas *et al.*,

2018). Según Srilatha (2011), El avance de la nanotecnología representa una técnica innovadora con un gran potencial en la agricultura y la biotecnología. En este contexto, la nanoagricultura implica el uso de partículas de tamaño nanométrico en la agricultura debido a los significativos beneficios que ofrecen a los cultivos (Saeid, 2016). A la luz de esta información, se llevó a cabo una evaluación del impacto de las nanopartículas de zinc tanto orgánicas como inorgánicas en el cultivo de pepino (Lira *et al.*, 2015). Considerando la información antes mencionada se evaluó el efecto de las nanopartículas de zinc orgánicas e inorgánicas sobre el cultivo de pepino.

## **1.1. Hipótesis**

### **1.1.1. Hipótesis general**

La planta de pepino variedad Poinsett 76, bajo la aplicación de nanopartículas de zinc orgánicas e inorgánicas, tendrá un mayor crecimiento, rendimiento y concentración foliar de nutrimentos en un sistema de producción semihidropónico en agricultura protegida.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Evaluar el efecto de nanopartículas de zinc orgánicas e inorgánicas sobre el cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) en un sistema semihidropónico en agricultura protegida.

### **1.1.2. 1.2.2. Objetivos específicos**

2. Determinar el efecto de nanopartículas de zinc sobre el crecimiento de pepino (altura de la planta, diámetro del tallo, edad a la floración y longitud de la raíz).
3. Evaluar el efecto de nanopartículas de zinc orgánicas e inorgánicas sobre los componentes del rendimiento (número de frutas por planta, longitud y diámetro de las frutas, peso de fruto y rendimiento).
4. Evaluar el efecto de nanopartículas de zinc orgánicas e inorgánicas en la concentración de nutrimentos (N, P, K, Ca, Mg y Zn) en el tejido foliar de pepino.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Origen y descripción del pepino

El cultivo de pepino tiene su origen en las áreas tropicales del sur de Asia, siendo la India el país que cultiva este producto desde hace más de 3000 años, fue introducido en América del Norte en el siglo XVI a través de las expediciones de Cristóbal Colón, quien transportaba semillas de hortalizas como provisiones para sus viajes. Posteriormente se extendió a todos los países en América (SIAP, 2020). En el presente, el 90% de la producción global proviene de diez países: China, Rusia, Turquía, Irán, Ucrania, Uzbekistán, México, Estados Unidos, España y Japón. Aunque China representa más del 50% de la producción global, su rendimiento por hectárea es de 54 toneladas. Por otro lado, los Países Bajos registran el rendimiento más alto con 685 toneladas por hectárea, lo que contrasta con China (FAOSTAT, 2020).

#### 2.1. Descripción botánica

La planta de pepino (*Cucumis sativus* L.) es parte de la familia Cucurbitácea. Es una planta anual, herbácea y rastrera con raíces agrupadas en racimos, y la mayoría de estas raíces se encuentran a una profundidad de 25 a 30 centímetros (Pulok *et al.*, 2014). La planta se distingue por tener tallos que pueden trepar o arrastrarse, altamente ramificados en su base, con cuatro ángulos claramente definidos y zarcillos simples (González, 2013). Las hojas son palmadas, con pecíolos, con forma de

corazón en la base y puntas afiladas. En sus hojas, se pueden observar de 3 a 5 lóbulos angulares, triangulares y con bordes dentados. Además, presentan vellosidades de color blanco (Pulok *et al.*, 2014). Los primeros brotes de flores comienzan a aparecer entre los 15 y 30 días después de haber realizado el trasplante de la planta. Este proceso, al igual que el período de producción, varía según las características de cada variedad y se ve influenciado por las condiciones climáticas del entorno en el que se cultiva (Vasco Morcillo, 2015).

### **2.1.1. Aspectos agronómicos**

#### **2.1.2. Temperatura**

En general el pepino puede adaptarse a condiciones de temperatura entre 14 y 37 °C (57 a 99 °F). La altitud para su crecimiento óptimo se encuentra hasta los 1,200 msnm. A lo largo de todo el ciclo de cultivo, se necesitaron 260 mm de agua para el pepino en términos de requisitos hídricos totales (Robles *et al.*, 2017).

#### **2.1.3. Humedad**

Debido a su extensa superficie foliar, la planta del pepino necesita mantener un nivel constante de humedad. La humedad relativa ideal oscila entre el 60% y el 70% durante el día, mientras que durante la noche se prefiere que esté en un rango de 70% a 90%. No obstante, los niveles excesivos de humedad durante el día pueden disminuir la producción debido a la reducción de la transpiración y, por lo tanto, de la fotosíntesis. (Suslow y Cantwell, 2016).

#### **2.1.4. Luminosidad en el invernadero**

La disminución de la intensidad de la luz puede afectar los procesos de floración y polinización, así como el crecimiento de la planta en momentos cruciales durante la etapa vegetativa. El pepino puede desarrollar una serie de adaptaciones en el tamaño y eficiencia del sistema de captura de radiación que compensen las variaciones en la disponibilidad de energía del sol (Zhang *et al.*, 2017). La adaptación incluye la acción conjunta de diferentes fotoreceptores como clorofilas, carotenoides y fitocromos, con los cuales el cultivo percibe la radiación fotosintéticamente activa como duración, intensidad, dirección y calidad espectral (Suslow y Cantwell, 2016).

#### **2.1.5. Suelos**

El cultivo pepino puede ser cultivado en diversos tipos de suelo, pero prospera especialmente en suelos que son sueltos, profundos, ricos en materia orgánica, bien drenados y que mantienen un pH en el rango de 5.8 a 6.8. Los suelos arcillosos y con un sistema de drenaje inadecuado pueden restringir y perjudicar el desarrollo del cultivo. El pH del suelo puede variar desde ligeramente ácido hasta ligeramente alcalino (INIFAP, 2017).

#### **2.1.6. Importancia del cultivo**

El pepino (*Cucumis sativus* L.) es reconocido como un cultivo de relevancia económica a nivel global, y en el caso de México, se ubica en el séptimo lugar en términos de producción, representando el 1% de la producción mundial. China y Rusia son los principales productores a nivel internacional. A nivel nacional, cerca del 60% de la

producción de pepino se concentra en tres estados: Sinaloa (33.1%), Sonora (18.3%) y Michoacán (7.8 %) y otros estados 40.7 % (SIAP, 2019).

La importancia del cultivo *Cucumis sativus* L. es reflejada en aspectos sociales y económicos, ya que genera sustento constante a muchos productores y familias campesinas. Así mismo, el fruto es fuente de vitaminas C, B1, B2, niacina, B6, vitamina E y A (Agriculturers, 2018). De acuerdo con esto, esta hortaliza tiene potencial para ser parte de la producción de alimentos que demanda la creciente población mundial (FAO, 2018).

#### **2.1.7. Variedades cultivadas en México**

En México, las variedades de pepino más comunes que se cultivan incluyen el pepino americano, el pepino americano-chino, el pepino blanco, el pepino europeo, el pepino persa y el pepino para encurtidos (pickle), las cuales tienen gran demanda en el mercado externo. De estas, el pepino americano ha tenido mayor aceptación entre los productos mexicanos debido a sus ventas en el mercado nacional, los pepinos se utilizan principalmente para consumo fresco, la elaboración de vinagre y se exportan a otros lugares (SIAP, 2019).

#### **2.1.8. Sistema de siembra**

El pepino se propaga por semillas, las cuales se siembran en charolas de propagación, y las plántulas se trasplantan cuando tienen dos hojas verdaderas. El uso de semillas de alta calidad genética es importante para competir en el mercado local o

internacional, debido a los requerimientos comerciales en cuanto a calidad del producto (Jasso-Chaverria *et al.*, 2015).

El trasplante de las plántulas de pepino en el invernadero se realiza en camas separadas entre 1.6 y 1.8 m, las plantas se colocan en filas dobles en cada lecho con un espacio de 0.3 a 0.5 m entre ellas (Ortiz y Moran, 2010).

### **2.1.9. Riego y drenaje**

El riego y drenaje es muy importante en el cultivo de pepino, por la demanda de humedad. Los sistemas más comunes y eficientes son el riego por goteo, microaspersión e infiltración con el fin de lograr rendimientos elevados, poniendo especial atención en la etapa de crecimiento y producción de frutos (Asgrow, 2018; Gálvez, 2015). Además, se debe regar de modo que el agua no tenga contacto con el tallo, así mismo al madurar los frutos conviene tener mayor cuidado con la distribución del agua, para no provocar pudriciones de fruto o la presencia de hongos que perjudiquen la planta; por lo tanto, los riegos deben de ser ligeros para evitar la presencia de mildiu (Asgrow, 2018).

### **2.1.10. Fertilización**

El cultivo de pepino presenta una respuesta favorable a niveles elevados de fertilización. Este aspecto está influenciado por las características del suelo y la calidad del agua, por lo que es esencial llevar a cabo un análisis del suelo y del agua antes de proceder con la siembra o plantación, con la finalidad de elaborar un programa de

fertilización con el objetivo de alcanzar una producción elevada con frutos de calidad superior (Adesemoye y Kloepper, 2015). Las aplicaciones de fertilizantes por lo general se aplican directamente al suelo o de manera foliar (Anjanappa *et al.*, 2012). Se recomienda dividir la aplicación de ciertos nutrientes, como el nitrógeno (N), en dos momentos: la primera durante la siembra y la segunda a mitad del ciclo de crecimiento. En cambio, el fósforo (P) y el potasio (K) pueden aplicarse en su totalidad en el momento de la siembra. Para ciertos nutrientes, como el nitrógeno (N), se sugiere realizar dos aplicaciones; la primera durante la siembra y la segunda a la mitad del ciclo de cultivo, mientras que el fósforo (P) y el potasio (K) pueden aplicarse en su totalidad en el momento de la siembra (Terry *et al.*, 2015), para el caso de riego presurizado, la aplicación de fertilizante se realiza durante los riegos.

## **2.2. Invernadero**

### **2.2.1. Producción de pepino en invernadero**

En general, la producción de cultivos bajo agricultura protegida tiene importancia económica a nivel nacional y mundial, según estudios en el año 2018, en México se cultivaron en un área de 19,597.0 hectáreas (FAOSTAT, 2020). Además, en México la agricultura protegida con cubierta de plástico es de 47%, el cultivo se realiza en un 50% bajo malla sombra, en un 2% bajo vidrio y en un 1% bajo otro tipo de material. En cuanto a la variedad por cultivo, el tomate representa el 70% de la producción en invernadero, mientras que el pepino constituye el 10%, el pimiento el 5%, y otros cultivos comprenden el 15% restante (Lenschak *et al.*, 2019).

Los estándares de calidad, seguridad alimentaria, presentación y certificación de productos agrícolas están siendo cada vez más rigurosos en los mercados. Como resultado de esta tendencia y los avances tecnológicos, el uso de invernaderos en la agricultura se ha incrementado notablemente (López-Elías *et al.*, 2015). Esto también se aplica al cultivo de pepino, ya que el sistema de invernadero ofrece la capacidad de ajustar parcial o completamente las condiciones climáticas y el ciclo de crecimiento de las plantas. Además, ayuda a contrarrestar los impactos adversos del entorno, como lluvias, vientos, heladas o plagas (Gómez *et al.*, 2003). Los cultivos en invernadero producen mayores rendimientos en comparación con los cultivos al cielo abierto, ya que las condiciones ambientales son más favorables. En estos entornos, las temperaturas varían de manera más controlada, el flujo de aire es más moderado y la presencia de plagas suele ser menor, lo que permite un mejor desarrollo de las plantas (FAO, 2018).

En la agricultura protegida, se logra producir alimentos de alta calidad, lo que ha llevado a una mayor adopción de este sistema. Este enfoque permite obtener cosechas abundantes y productos de excelente calidad, especialmente en el caso de tomates, pimientos y pepinos. Cultivar bajo condiciones de invernadero permite enfrentar condiciones climáticas desfavorables y, como resultado, obtener precios más favorables en comparación con el cultivo al aire libre (Vasco Morcillo, 2015).

### **2.2.2. Cultivo en invernadero**

En términos generales, en el cultivo en invernadero se persiguen tres objetivos claramente definidos: 1) producir cosechas fuera de temporada, especialmente cuando las condiciones climáticas locales son desfavorables para la producción al aire libre; 2) aumentar la producción, lo cual se logra gracias a la atención minuciosa y las condiciones de cultivo beneficiosas proporcionadas por las estructuras de protección; y 3) mejorar la calidad comercial de los productos obtenidos (Lenscak, 2019).

### **2.2.3. Sistema de producción**

La producción de pepino en invernadero se lleva a cabo en varios países y en México, se ha adoptado este método de cultivo, que involucra el uso de variedades de pepino de crecimiento indeterminado plantadas en suelo o sustratos con una densidad de 1.5 a 2.5 plantas por metro cuadrado. Las plantas se permiten crecer hasta alcanzar una altura de 3 m y luego se continúa guiándolas horizontalmente o hacia abajo mediante el proceso de tutoría (López-Elías *et al.*, 2015). Según la FAO (2018) la tecnología de invernaderos permite reducir la duración del ciclo de cultivo y aumentar la producción anual al permitir la realización de más ciclos en un año.

### **2.2.4. Humedad relativa**

La humedad relativa en invernadero es uno de los aspectos tener en cuenta para lograr la salud y crecimiento adecuados del cultivo. El aire dentro del invernadero se carga con vapor de agua que proviene tanto del suelo como de la transpiración de las plantas, en este contexto, es esencial controlar la ventilación de manera cuidadosa para prevenir niveles excesivamente elevados, debido a que pueden causar enfermedades

fungosas en diferentes tejidos de la planta. Los niveles ideales de humedad relativa para algunos cultivos bajo condición protegida son: pepino 70-90%, tomate: 55-60% de humedad relativa, pimiento: 65-70%, berenjena: 65-70%, y melón: 60-80% (Lenschak, 2019).

### **2.2.5. Superficie destinada al pepino en invernaderos**

En el año 2014, en México se cultivaron 1,008 ha de pepino en invernaderos, con una producción promedio de 110.0 ton ha<sup>-1</sup>. En ese mismo año, en el estado de Sonora se destinaron 26 ha para el cultivo de pepino, logrando un impresionante rendimiento promedio de 305.4 ton ha<sup>-1</sup>. Esto situó a Sonora en el octavo lugar en términos de superficie cultivada a nivel nacional y en el primer lugar en cuanto a rendimiento de producción (SIAP, 2017).

En entornos de invernadero, la cantidad de pepinos producidos puede ser de 2 a 9 veces superior en comparación con el cultivo en campo abierto, y esto varía en función del grado de tecnología empleado, las prácticas de gestión y las condiciones climáticas (SIAP, 2021), además, esto también representa una opción para ampliar la variedad de cultivos en este sistema de producción.

### **2.2.6. Sistema de siembra y exportación**

La elección de la densidad de siembra adecuada es un elemento crucial para aumentar al máximo la producción. En la actualidad, la separación típica utilizada para cultivar pepinos oscila entre 1.5 y 2.0 metros entre filas y entre 0.2 y 0.3 metros entre plantas.

Sin embargo, existe una escasez de estudios que hayan evaluado los efectos de la densidad de siembra con nuevas variedades, lo que subraya la importancia de optimizar la cantidad de plantas en el cultivo de pepinos, especialmente en aquellas variedades que tienen semillas costosas (Gálvez, 2015).

Según Vasco (2015), más del 60% de los pepinos que México exporta se cultivan en sistemas de cultivo protegido. Estos sistemas emplean tecnologías avanzadas como variedades de pepino de alto rendimiento y con una mayor vida útil después de la cosecha, técnicas de siembra de precisión y el uso de acolchados, uso de fertirrigación y maquinaria especializada para empaque. México es líder en las exportaciones globales de pepinos, contribuyendo con el 25% del volumen total exportado a nivel mundial. Además, ocupa el primer puesto como país exportador de esta hortaliza a los Estados Unidos de América (Reho, 2015).

### **2.2.7. Cosecha**

La cosecha del pepino se lleva a cabo en diferentes etapas de su crecimiento. El tiempo que transcurre desde la floración hasta la cosecha varía entre 55 y 70 días, dependiendo de la variedad y las condiciones de temperatura. Por lo general, los pepinos se recolectan cuando aún están ligeramente inmaduros, cerca de alcanzar su tamaño final (Suslow y Cantwell, 2016).

### **2.3. Nanopartículas (NPs)**

Por definición, las NPs son estructuras formadas por átomos o moléculas que tienen al menos una dimensión que oscila entre 1 y 100 nm. y contienen metales (ZnO, SiO, FeO<sub>3</sub>), carbono (nanotubos de grafeno y carbono), nanoquitosán y zeolita (Hossain *et al.*, 2021; Singh *et al.*, 2021).

Las aplicaciones de las NPs requieren que tengan cierto rango de tamaños, recubrimientos, dispersiones o compuestos, para lo cual se utilizan métodos de síntesis particulares con el propósito de generar una variedad de nanopartículas, (Alarcón *et al.*, 2012). La temperatura, la concentración, la composición química, el pH, las alteraciones en la superficie y la gestión del proceso son factores que permiten el control del tamaño de las partículas, su composición química y su estructura cristalina (Redetic, 2013). Las NPs a menudo presentan propiedades distintas a los materiales tradicionales o compuestos que las forman (Tonder *et al.*, 2015).

#### **2.3.1. Importancia de las nanopartículas**

La nanotecnología ha cobrado importancia por sus usos en los campos de la agricultura, la industria y la medicina (Usman *et al.*, 2020). En la agricultura se está utilizando como fertilizantes, fungicidas y como agentes para incrementar metabolitos secundarios, aunque los nanosistemas para la producción agrícola aún no se materializan en aplicaciones comerciales (Robles y Cantú, 2017, Juárez-Maldonado *et al.*, 2018). En la industria del alimento, se ha encontrado que con esta tecnología se

pueden elaborar alimentos más saludables y nutritivos (Rogers *et al.*, 2008).

### **2.3.2. Nanopartículas en agricultura**

La nanotecnología en la agricultura está empleando para disminuir el uso de productos químicos en la agricultura y para aumentar el rendimiento de las plantas mediante la mejora de la administración de nutrientes (Juárez-Maldonado *et al.*, 2018). Esta mejora se logra mediante el uso de nanocápsulas que liberan pesticidas, fertilizantes y otros productos químicos agrícolas de manera más efectiva y regulada (Garza-Alonso, 2022).

Además, existen los nanosensores, que tienen la capacidad de supervisar las condiciones de desarrollo de cultivos y detectar la presencia de insectos y patógenos en las plantas (Fraceto *et al.*, 2016).

La eficiencia en el uso de agroquímicos se puede incrementar utilizando NPs, esto conlleva a una disminución en la cantidad de sustancias necesarias, lo que resulta en una mejora en términos ambientales (García, 2017). Además, el desarrollo tecnológico contempla nanosensores con aplicaciones, por ejemplo, regenerar suelos degradados, tratar enfermedades de los cultivos de manera efectiva, degradar rápidamente moléculas complejas de pesticidas y mejorar la absorción de nutrientes por parte de las plantas son acciones que, cuando se combinan, pueden llevar a una agricultura más rentable y respetuosa con el medio ambiente (Handford *et al.*, 2014).

### **2.3.3. Nanopartículas de zinc en horticultura**

Las NPs de Zn tienen un efecto positivo debido a la liberación lenta y prolongada de iones de zinc ( $Zn^{++}$ ) a lo largo de un período extenso (Matinise *et al.*, 2017). Sin embargo, cuando se excede en la concentración, puede influir en el desarrollo de las plantas y causar estrés oxidativo al producir especies reactivas de oxígeno, lo que conlleva alteraciones en la actividad del sistema de enzimas antioxidantes (Sinclair y Krämer 2012, Juárez-Maldonado *et al.*, 2021).

Shalaby *et al.* (2016) indican que las nanopartículas podrían ser captadas por la endodermis de la raíz mediante el apoplasto y posteriormente transportadas al cilindro vascular mediante el movimiento simplástico. Luego, estas nanopartículas son transferidas a los tallos, las hojas y los frutos a través de los tejidos conductores, el xilema y el floema (Hernandez-Viezcas *et al.*, 2013).

La utilización de nanopartículas de óxido de zinc tiene impactos beneficiosos en aspectos fisiológicos y de nutrición en ciertos cultivos, como el aumento de los nutrientes en los frutos. Sin embargo, también puede ocasionar modificaciones que generan estrés y toxicidad en las plantas, lo que a su vez estimula la activación de los sistemas antioxidantes (García-Gómez *et al.*, 2017).

### **2.3.4. Nanopartículas orgánicas sintetizadas de moringa**

La planta *Moringa oleifera* Lam. es un árbol que se originó en la India y que en la actualidad se encuentra en diversas regiones del mundo, incluyendo países del Sur de

África, Asia, América y el Caribe. En algunos estudios han reportado que sus hojas contienen sustancias hipotensoras, anticancerígenas, hipoglucémicas y antibióticas (Goja *et al.*, 2013). Según Zanella (2012) la síntesis de NPs se lleva a cabo mediante dos métodos físicos, el primero cuando componentes del material vegetal se rompen en partículas más pequeñas y los métodos químicos, cuando las células de moringa actúan como centros de nucleación, formando clusters, donde se siguen agregando átomos, formándose partículas de mayor tamaño.

Los mecanismos propuestos para la producción de nanopartículas a partir de extractos de plantas implican un proceso de reacción redox que se basa en la capacidad reductora de ciertos elementos celulares, como carbohidratos, proteínas, fenoles, ácidos orgánicos y otros compuestos presentes en los extractos, que a su vez pueden funcionar como estabilizadores de las NPs formadas (Kumar *et al.*, 2013). Las proteínas actúan como agentes estabilizadores al crear una capa orgánica mediante el proceso de adsorción (Rai y Yadav, 2013).

Ahmed *et al.* (2017) indican que el mecanismo de síntesis de nanopartículas es dependiente de los fitoquímicos tales como fenoles, alcaloides, flavonoides, saponinas, taninos, terpenoides, carbohidratos, etc. El proceso puede estar relacionado con un solo metabolito o bien con un conjunto de metabolitos. Algunos autores han reportado diferentes grupos funcionales que pueden intervenir en la biosíntesis de NPs, por ejemplo; los aldehídos, alcoholes, aminas, cetonas, carboxilos y sulfhidrilos (Salunkhe *et al.*, 2012, Huang *et al.*, 2015).

## 2.4. Zinc (Zn)

El Zn es un elemento esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Las cantidades de zinc que requieren las plantas para el crecimiento y desarrollo son muy pequeñas, encontrándose en un rango de 15 a 20 mg Kg<sup>-1</sup>; estas cantidades representan menos del 0.02 % del peso seco total (Nava *et al.*, 2017), por lo que este elemento es clasificado como un micronutriente.

La importancia del Zn para las plantas se debe a la capacidad de funcionar como un estabilizador de proteínas es esencial, ya que se requiere para activar enzimas que participan en una variedad de procesos metabólicos (Sturikova *et al.*, 2018). Además, es esencial para el metabolismo de los ácidos nucleicos, ya que forma parte de las enzimas y proteínas que desempeñan un papel en la síntesis del ADN y ARN de transferencia (Sela, 2017).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Ubicación de los Experimentos

Los experimentos fueron establecidos en los invernaderos del Centro de Agricultura Protegida (CAP) de la Facultad de Agronomía de la UANL (FAUANL). El Centro está ubicado en el Campus de Ciencias Agropecuarias en el municipio de Gral. Escobedo, N.L., con coordenadas geográficas de 25° 47' 07'' latitud Norte, 100° 17' 03'' longitud Oeste, con altitud de 479 msnm (INEGI, 2020). El clima de la región es considerado semiárido, con una precipitación media anual de 550 mm y una temperatura media anual de 23 °C (SMN, 2020).



**Figura 1.** Campus de Ciencias Agropecuarias en el municipio de Gral. Escobedo, N.L. (INEGI, 2020).

#### 3.1.1. Características de los invernaderos

El experimento sobre el cultivo de pepino se llevó a cabo en el invernadero de tipo gótico, que tiene una superficie de 1,000 m cuadrados. Este invernadero tiene una altura de aproximadamente 4.5 m en la canaleta y 5.5 m en la parte superior, llegando a alcanzar su punto más alto a los 7 m. Se clasifica como un invernadero de tecnología de nivel medio-bajo. Por otro lado, el invernadero utilizado para el experimento con

tomates es de tipo israelita, también conocido como de diente de sierra, y posee las mismas dimensiones que el invernadero gótico.

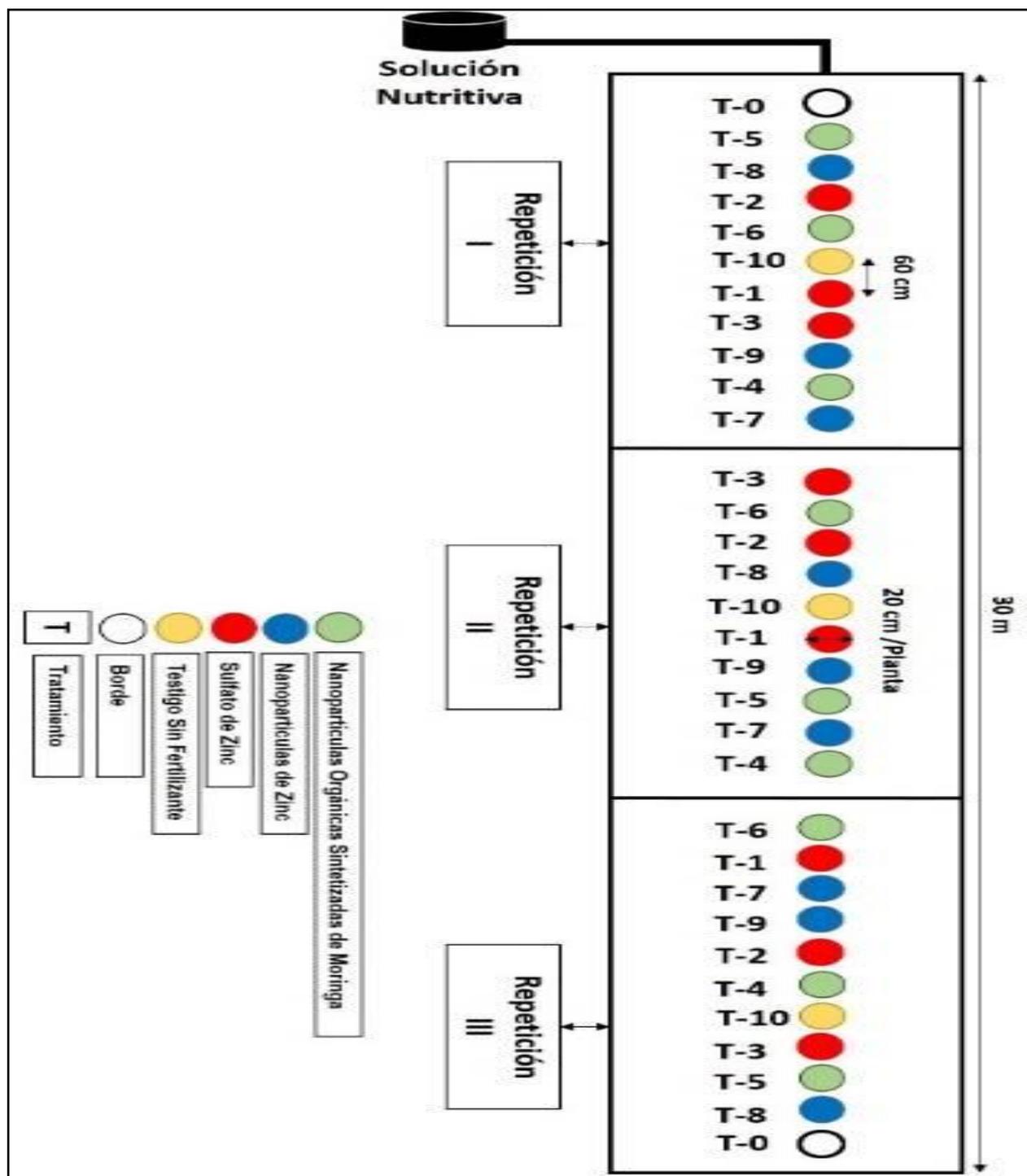


**Figura 2.** Invernadero Gótico de investigación del CAP en el municipio de Gral. Escobedo, N.L.

### **3.2. Diseño experimental**

El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar, con diez tratamientos y tres repeticiones. El experimento tuvo 30 unidades experimentales (UE); cada una de las UE consistió en un contenedor con capacidad de 19 L con dos plantas de pepino, en un marco de plantación de 20 cm entre plantas y 60 cm entre contenedores. El sustrato que se utilizó fue perlita y el riego se realizó por goteo utilizando una solución nutritiva.

Los tratamientos fueron comparados mediante análisis de varianza. En las variables en donde se detectó una diferencia significativa realizaron pruebas de comparación de medias utilizando el método de Tukey. También se realizaron correlaciones para determinar el grado de asociación de los nutrientes foliares con el rendimiento. Se realizaron análisis estadísticos de todos los datos utilizando el software estadístico SPSS 20 (IBM, 2015).



**Figura 3.** Mapa del diseño experimental en el invernadero gótico del CAP (FAUANL).

Los tratamientos consistieron en: un testigo sin fertilizante, donde se aplicó 250 ml de agua, un fertilizante químico (sulfato de zinc), un fertilizante en forma de NPs de zinc y un fertilizante en forma de nanopartículas orgánicas sintetizadas a partir de moringa. Los tres fertilizantes se aplicaron en forma foliar en tres dosis (D1-100, D2-300 y D3-500 ppm) (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Tratamientos evaluados en los experimentos.

<b>Descripción</b>	<b>Tratamientos</b>	<b>Dosis (ppm)</b>
Zinc (Sulfato de Zinc)	T1; T2; T3	D1-100; D2-300; D3-500
Nanopartículas Orgánicas Sintetizadas de Moringa	T4; T5; T6	D1-100; D2-300; D3-500
Nanopartículas de Zinc	T7; T8; T9	D1-100; D2-300; D3-500
TSF	T10	D-500

### 3.3. Experimento 1. Pepino

#### 3.3.1. Material vegetal

Se utilizó la variedad de pepino denominada Poinsett 76, que muestra resistencia a enfermedades como la mancha angular de la hoja, la antracnosis, la roña y los mildiús (Jellani *et al.*, 2015). La semilla fue proporcionada por el Centro de Agricultura Protegida de la FAUANL.

#### 3.3.2. Producción de plántulas

Las plántulas de pepino se realizaron en bandejas de propagación de poliestireno con 32 compartimentos cada una. Como medio de cultivo se empleó turba (peat moss) sanitizado a temperatura de 65°C por una (1) hora, con la finalidad de lograr plántulas libres de enfermedades.

La semilla fue depositada a una profundidad de 1.0 cm y posteriormente se aplicó un riego ligero, la charola de propagación se cubrió con plástico con la finalidad de conservar la humedad y se colocó a una temperatura de 27 °C. Después de dos días, la charola se transfirió al invernadero de producción de plántulas. Posteriormente, los contenedores se llenaron con el sustrato preparado.

Al momento del trasplante, las plántulas se trataron utilizando una solución de Previcur N (Propamocarb Clorhidrato) en dosis de 1.5 mL L<sup>-1</sup>, Derosal (Carbendazim) en dosis de 0.5 g L<sup>-1</sup> y Confidor (Imidacloprid) en dosis de 0.8 mL L<sup>-1</sup>, con la finalidad de evitar

plagas y enfermedades. En el trasplante se colocaron dos plantas por cada contenedor.



**Figura 4.** Producción de plántulas en charolas de propagación de poliestireno de 32 cavidades.

### **3.3.3. Establecimiento del cultivo de pepino**

Las primeras plantas emergidas se observaron el 12 de enero del 2022, ocho días después de la siembra. La fertilización se realizó el 9 de febrero cuando las plántulas desarrollaron sus primeras hojas verdaderas, el fertilizante aplicado fue una solución con una proporción de 18-18-18 (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O) a una concentración de 0.5 g L<sup>-1</sup> de agua

### **3.3.4. Preparación del suelo**

En el sitio donde se estableció el experimento se preparó el drenaje de los contenedores mediante la construcción de una canaleta de 30 m de largo y 1 m de ancho, sobre la canaleta se colocó plástico para recolectar los escurrimientos de la solución nutritiva de los contenedores, posteriormente se colocaron trozos de madera como soporte de los 32 contenedores de 19 L, para el experimento se utilizaron 30 contenedores y se colocaron contenedores en los extremos como protección. Posteriormente se instalaron las mangueras y goteros para el sistema de fertirriego.

### 3.3.5. Características del análisis del agua utilizada en la solución nutritiva

En el cuadro 2 se reportan los resultados del análisis del agua, caracterizada como agua no salina, con un pH ligeramente alcalino, con niveles medios de Ca y Mg, no sódico y contenido moderado de bicarbonatos.

La solución nutritiva se calculó considerando los niveles de los nutrientes en el agua. Los bicarbonatos se neutralizaron con la aplicación de ácido fosfórico, dejando 1 meq L<sup>-1</sup>.

**Cuadro 2.** Características del análisis del agua utilizada en la preparación de la solución nutritiva.

<b>Características químicas</b>	
C.E.	0.75 dS/m
pH	7.62
Ca <sup>++</sup>	5.3 meq L <sup>-1</sup>
Mg <sup>++</sup>	2.2 meq L <sup>-1</sup>
CO <sub>3</sub>	0 meq L <sup>-1</sup>
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	3.6 meq L <sup>-1</sup>
Cl <sup>-</sup>	2.5 meq L <sup>-1</sup>
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	1.4 meq L <sup>-1</sup>
Na <sup>++</sup>	0.1 meq L <sup>-1</sup>
Aniones	7.5 meq L <sup>-1</sup>
Cationes	7.5 meq L <sup>-1</sup>

### 3.3.6. Riego y fertirriego

El sistema de riego fue por goteo, en donde se aplicó la solución nutritiva. El riego se programó con un temporizador con 8 frecuencias diarias de un minuto de duración, las frecuencias fueron ajustadas de acuerdo con las necesidades del cultivo, procurando tener un 30 % de drenaje. El primer impulso de riego se aplicó a las 7:30 de la mañana y el último a las 7:30 de la noche; cada uno de los emisores tiene un gasto de 100 mL de agua por minuto.

La concentración de la solución nutritiva fue: Nitrógeno 182 ppm; Fósforo 46.5 ppm; Potasio 234 ppm; Calcio 200 ppm; Magnesio 36 ppm. Los microelementos se aplicaron en las siguientes concentraciones en ppm: 1.5, 0.8, 0.06, 0.3, 0.4 y 0.05 para Fe, Mn, Cu, Zn, B y Mn, respectivamente.

El Cuadro 3 reporta los elementos presentes en la solución nutritiva, la dosis en gramos o litros en 450 L de agua, la fórmula química en la que se presentan, conductividad del agua, el pH y la conductividad eléctrica de la solución nutritiva

**Cuadro 3.** Fertilizantes utilizados en la preparación de 450 L de solución nutritiva.

<b>Fertilizante</b>	<b>Formula química</b>	<b>Dosis</b>
<b>Macronutrientes</b>		
12-0-46	N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O	185.1 g
0-52-34	N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub>	34.5 g
18-18-18	N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub>	166. g
Nitrato de calcio	Ca (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	320 g
Sulfato de Magnesio	MgSO <sub>4</sub>	121.95 g
<b>Micronutrientes</b>		
Sulfato de cobre	Cu SO <sub>4</sub>	1.3 mg
Ácido Bórico (Boro)	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	10.3 mg
Fierro	Fe SO <sub>4</sub>	8 mg
Ácido sulfúrico	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	31.5 ml
<b>Solución</b>		
Agua	CE= 0.7 dS/m	450 L
pH de la solución	5.78	
C.E. de la solución	2.52 dS/m	

### 3.3.7. Trasplante

El trasplante se realizó el día 26 de febrero del 2022, a 32 contenedores de 19 litros.

El método de siembra utilizado fue de dos plantas a una distancia de 0.20 m en el contenedor, la distancia entre los contenedores fue de 0.60 m. Las plantas se sujetaron

con dos rafias blancas por unidad experimental tratadas con cloro. Se instaló un anillo en la base del tallo y se utilizó rafia para guiar el crecimiento vertical del pepino.

### 3.3.8. Preparación de las nanopartículas

Las nanopartículas se dispersaron con un sonicador en el laboratorio de química de la FAUANL, este proceso duró 20 minutos. Las dosis de nanopartículas (D1-100; D2-300; D3-500 ppm) para cada tratamiento se prepararon de acuerdo con las dosis descritas en el Cuadro 4.

**Cuadro 4.** Nanopartículas y dosis aplicadas en el experimento.

Descripción	Tratamientos	Dosis
Nanopartículas de Zinc 140 mg en 250 ml	T6 y T7 (100 ppm)	27.78 ml NPs + 222.2 ml de agua
	T5 y T8 (300 ppm)	83.34 ml NPs + 166.66 ml de agua
	T4 y T9 (500 ppm)	138.9 ml NPs + 111 ml de agua
Nanopartículas Orgánicas Sintetizadas de Moringa 140 mg en 250 ml	T6 y T7 (100 ppm)	27.78 ml NPs + 222.2 ml de agua
	T5 y T8 (300 ppm)	83.34 ml NPs + 166.66 ml de agua
	T4 y T9 (500 ppm)	138.9 ml NPs + 111 ml de agua
Zinc (Sulfato de Zinc); 1520.35 mg = 1.520 gramo en 250 ml de agua	T1 (100 ppm)	27.78 ml NPs + 222.2 ml de agua
	T5 y T8 (300 ppm)	83.34 ml NPs + 166.66 ml de agua
	T4 y T9 (500 ppm)	138.9 ml NPs + 111 ml de agua
TSF	T10 (500 ml)	250 ml de agua en cada repetición

### 3.3.9. Aplicación de los tratamientos

Durante la fase experimental se realizaron dos aplicaciones de nanopartículas, la primera aplicación fue 18 días después de la siembra, la siguiente aplicación se realizó a los 25 días después de la primera aplicación. Las nanopartículas y el fertilizante químico se aplicaron en forma foliar y en el testigo se aplicó agua desionizada. En la

primera aplicación se observó daño por toxicidad en la dosis de 500 ppm, observándose en las hojas necrosis en algunas partes (Figura 4).



**Figura 5.** Aplicación de NPs de ZnO daño por toxicidad en la dosis de 500 ppm

### **3.3.10. Cosecha**

La cosecha se realizó manualmente utilizando tijera de jardinería, el día 20 de abril de 2022 (54 días después del trasplante), cuando los frutos alcanzaron el grado de madurez de cosecha, realizando en total 5 cortes (20/04/2022, 8/04/2022, 3/05/2022, 10/05/2022 y 23/05/2022). Luego, las hojas se separaron, tallos y raíces, registrando su peso para cuantificar la cantidad de material fresco, después se colocaron en bolsas de papel para proceder a secar.

### **3.3.11. Variables evaluadas**

El registro de datos se realizó semanalmente, donde se midieron las siguientes variables: altura de la planta, diámetro del tallo, edad de floración y número de hojas. Al final del ciclo de cultivo se registraron datos del número de frutas por planta, peso del fruto, diámetro del fruto, longitud del fruto y rendimiento por unidad experimental.

Los primeros datos se registraron a los 7 días después del trasplante, los posteriores datos a los 14, 21, 28, 35, 42, 49 y 56 días.

### **3.3.12. Descripción de las variables evaluadas**

#### **3.3.12.1. Altura de la planta (cm)**

Se registró la altura de las plantas semanalmente, marcando en la rafia el punto apical y por diferencia de la marca de la semana anterior se determinó el incremento en la altura. Al final del experimento se realizó el cálculo para obtener los datos de la altura total de la planta.

#### **3.3.12.2. Días a la floración**

Para determinar los días a la floración se consideró el tiempo desde la siembra hasta el día en el que el 50% de las plantas entraron a esta etapa de desarrollo en cada tratamiento.

#### **3.3.12.3. Diámetro del tallo (mm)**

El diámetro del tallo fue medido con un vernier digital de marca Caliper los días 29/03/2022, 8/04/2022, 18/4/2022 y 6/05/2022. Las lecturas del diámetro se registraron en el punto marcado en la rafia la semana anterior. La variable que se analizó fue el promedio de los diámetros de tallo registrados en las cuatro fechas.

#### **3.3.12.4. Número de frutas por plantas**

El número de frutos fue por conteo directo de los frutos cosechados en cada planta.

#### **3.3.12.5. Longitud del fruto (cm)**

Para determinar esta variable se midió la longitud de las frutas cosechadas desde el pedúnculo hasta el ápice, midiendo con una cinta métrica (cm).

#### **3.3.12.6. Diámetro del fruto (mm)**

El diámetro de fruto fue medido con un vernier, registrando el promedio de los diámetros de los frutos por planta en cada tratamiento.

#### **3.3.12.7. Peso de fruto (g)**

El peso del fruto se registró al momento de la cosecha en cada unidad experimental y al finalizar el ciclo de cultivo se sumaron todos los pesos de los frutos para determinar el rendimiento, utilizando una balanza de marca Torrey.

#### **3.3.12.8. Rendimiento**

El rendimiento se registró tomando la totalidad de los frutos pesados en cada una de las fechas de cosecha en cada unidad experimental. El rendimiento se expresó en kg.

### 3.3.13. Análisis foliar en el cultivo de pepino

El análisis foliar fue para determinar el estado nutricional de las plantas una vez concluida la temporada de cosecha. La muestra fue recolectada en cada unidad experimental en hojas recientemente maduras, después de secar las hojas en una estufa a 65°C, se procedió a triturarlas y se guardarán para su análisis en el futuro.

Los análisis de las hojas se realizaron en el laboratorio de suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Unidad Marín. Se realizaron análisis para determinar los niveles de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y zinc. Para el nitrógeno, se aplicó el método de Kjeldahl; para el fósforo, se empleó un método colorimétrico; y en el caso del potasio, calcio, magnesio y zinc, se utilizó la espectrofotometría de absorción atómica (Monsalve *et al.*, 2009; Puentes-Páramo *et al.*, 2016).

Los procedimientos del análisis foliar se describen a continuación:

1. Los crisoles que contenían las muestras se introdujeron en la mufla y se mantuvieron a una temperatura de 550°C durante un período de cuatro horas.
2. Las muestras se dejaron enfriar durante 24 horas en una campana.
3. Se añadió agua destilada a las cenizas contenidas en los crisoles.
4. Se dispuso de un gramo de muestra de cada unidad experimental y se colocó en un crisol Gooch.

5. Los crisoles se ubicaron en la campana de extracción de gases y se añadieron 2 mL de ácido clorhídrico (HCL) concentrado a cada crisol mediante una micropipeta.
6. Luego, se colocaron los crisoles sobre una superficie caliente para propiciar una evaporación gradual.

Posteriormente se añadieron 2 mL de ácido clorhídrico (HCL) 1 N a cada crisol antes de llevar a cabo el proceso de filtración, teniendo en cuenta los siguientes pasos:

- a) Colocamos papel filtro de tipo Whatman No 1, con un diámetro de 110 mm, en embudos diseñados específicamente para este propósito.
- b) El filtro se mojó con agua destilada, lo que evitó que se moviera y previno pérdidas de muestra debido a la absorción.
- c) Se agitó el embudo de manera vigorosa para eliminar el exceso de líquido.
- d) Los embudos fueron colocados encima de frascos de 30 mL.
- e) A cada recipiente que contenía las cenizas se le agregaron 15 mL de ácido clorhídrico (HCl) 1 N, y se removió con un palillo de vidrio para desprender las cenizas de las paredes del recipiente.
- f) El contenido se vertió en el embudo con el filtro.
- g) Posteriormente, se incorporaron los 125 mL de una solución de agua con HCl 1 N al crisol, lo que resultó en la dilución adicional de las cenizas, y se vertió esta mezcla en el embudo para su filtración.
- h) Se extrajo una muestra de los 125 mL y se transfirió a frascos de 30 mL.

- i) i) Se conservaron los frascos de 30 mL con el extracto para futuras determinaciones de fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y zinc (Zn).

#### **3.3.13.1. Análisis de nitrógeno (N)**

Se utilizó el procedimiento Kjeldahl para la determinación del contenido de nitrógeno. Este método se caracteriza por su uso de la ebullición y el empleo de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) concentrado, lo cual simplifica la descomposición oxidativa de la materia orgánica en la muestra, transformando así el nitrógeno orgánico en amoníaco. El amoníaco formado se captura en forma de bisulfato de amonio y luego se puede cuantificar en el lugar o a través de un proceso de destilación alcalina seguido de titulación.

#### **3.3.13.2. Digestión**

Un gramo de la muestra se introdujo en un matraz de micro Kjeldahl.

1. Se añadió una mezcla catalizadora compuesta por 10 gramos de  $\text{K}_2\text{SO}_4$  y 0.5 gramos de  $\text{CuSO}_4$ .
2. Se incorporaron 10 perlas de vidrio.
3. Luego se vertieron 30 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en los matraces.
4. Los matraces se colocaron en el dispositivo de digestión Micro Kjeldahl (durante este período, se giraron los matraces cada 15 minutos). La digestión se consideró completa después de 45 minutos, cuando la solución adquirió un tono azul verdoso.

5. La solución se dejó enfriar y se le añadieron 100 mL de agua destilada. Luego, se trasvasó la solución a un matraz Kjeldahl.

#### 3.3.13.3. Destilación

1. Se colocaron 30 mL de una solución al 4% de  $H_3BO_3$  en un matraz Erlenmeyer, junto con seis gotas de indicador (Una combinación de indicadores de rojo de metilo y verde de bromocresol). Luego, se introdujo el tubo inferior del sistema de enfriamiento de la destilación en el matraz Erlenmeyer.
2. Se inclinó el matraz Kjeldahl a un ángulo de 45 grados y se introdujeron algunas pequeñas piezas de zinc junto con 20 mL de solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 40%.
3. El matraz Erlenmeyer se retiró una vez que había recogido 125 mL de destilado, y se observó que el cambio de color de la solución cambió de rojo a azul.

#### 3.3.13.4. Titulación

1. Se llenó una bureta de 50 mL con una solución de HCl 0.1 N.
2. Después, se añadió el ácido con cuidado y de manera gradual al matraz Erlenmeyer que tenía la solución destilada, manteniendo una agitación constante, hasta que la solución adquirió un tono rojo ámbar.

Para determinar el porcentaje de nitrógeno, se utilizó la fórmula siguiente:

$$\text{Porcentaje de N} = \frac{\text{Resultado de la Muestra} - \text{Blanco (1.7)}}{1.7} * 0.14$$

### 3.3.13.5. Análisis de fósforo (P)

La determinación del fósforo (P) se efectuó mediante la técnica del amarillo vanadato molibdato. A partir del extracto obtenido tras la digestión de la muestra, se siguieron los procedimientos descritos a continuación:

1. Se tomó 1 mL de cada muestra y se transfirió a un matraz aforado de 25 mL, lo que implicó un factor de dilución de 25.
2. Durante el proceso, se prestó atención a la coloración de la muestra, asegurándose de que coincidiera con la gama de colores de la curva de calibración.
3. En el caso de las muestras, se tomó una cantidad de 0.1 mL y se transfirió a un matraz aforado de 25 mL, lo que resultó en un factor de dilución de 250.
4. Luego, se añadieron 5 mL del reactivo de amarillo vanadato.
5. El matraz se completó con agua destilada hasta alcanzar su capacidad de 25 mL, según el aforo.
6. La muestra se mantuvo en reposo durante un lapso de 15 minutos.
7. Luego, La muestra se transfirió a una celda utilizada en el espectrofotómetro UV (S0/2150).
8. La celda se colocó en el espectrofotómetro y se realizó la lectura de la absorbancia a una longitud de onda de 470 nm. Para construir la curva de calibración de P, se prepararon soluciones de referencia con concentraciones de 0, 0.4, 0.8 y 1.2 partes por millón (ppm) de fósforo, siguiendo el mismo proceso mencionado previamente.

### 3.3.13.6. Los análisis de K, Ca, Mg y Zn

Para cuantificar los elementos potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg), se realizó una dilución de 1 a 500 utilizando un matraz de 25 mL con agua y se agregaron 0.05 mL del extracto. Luego, se transfirió esta solución a un frasco de 30 mL, y se llevó a cabo la medición utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica de la marca Unión Thermo. Por otro lado, el zinc (Zn) se preparó con una dilución de 1 a 3 antes de su análisis.

El principio básico de la técnica de absorción atómica se basa en la capacidad de los átomos de absorber radiación a una longitud de onda específica. En este proceso, la muestra (en forma líquida, en este caso el extracto) se aspira a través de un tubo capilar y se dirige hacia un nebulizador, donde se descompone y se convierte en una fina niebla o gotas diminutas de líquido. Estas gotas se llevan a una llama, donde los átomos presentes en la muestra absorben la radiación generada por una lámpara. La cantidad de radiación absorbida depende directamente de la concentración de los átomos en la muestra. Posteriormente se calculó la concentración final con la siguiente ecuación:

**Concentración final =  $\frac{\text{Lectura del aparato} - \text{Media (Blanco)}}{\text{Factor de Dilución Total (FDT)}}$**

### **3.4. Experimento 2. Tomate (*Solanum lycopersicum* L.)**

El experimento 2 se realizó durante el intervalo de tiempo abarcado entre octubre de 2022 y febrero de 2023, y se desarrolló en el invernadero de tipo israelita que se encuentra en el Centro de Agricultura Protegida de la Facultad de Agronomía de la UANL. En donde se comparó el efecto de las nanopartículas de zinc orgánicas e inorgánicas en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo condiciones de invernadero. Los tratamientos, el croquis y el diseño experimental aplicados fueron los mismos que se utilizaron en el primer experimento.

#### **3.4.1. Material vegetal**

La variedad de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) utilizada fue El Cid, la cual es resistente a la mancha angular de la hoja, antracnosis y los mildiús. La semilla fue proporcionada por el Centro de Agricultura Protegida de la FA-UANL.

#### **3.4.2. Producción de plántulas**

La producción de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) se realizó en agosto del 2022 utilizando el mismo procedimiento del primer experimento, con algunas modificaciones.

#### **3.4.3. Preparación del suelo**

El proceso de preparación del suelo comenzó con la tarea de limpiar las camas de cultivo, lo que implicó la eliminación de malezas, cintillas, rafia y clips que pudieran

estar presentes. Luego, el suelo se preparó mediante el uso de un roto cultivador, que trabajó a una profundidad de 0.30 m, las camas se formaron con pala y azadón. En las camas se aplicó cal agrícola como enmienda debido a niveles altos de sodio en el suelo, también se aplicó gallinaza para mejorar algunos aspectos del suelo como porosidad, fertilidad y actividad biológica. Posteriormente se realizó la elaboración de las camas de 33 m de largo y 60 cm de ancho. Además, se llevó a cabo la instalación del sistema de riego por goteo y se procedió a identificar los diferentes tratamientos.

#### **3.4.4. Establecimiento del cultivo**

La preparación de la plántula de tomate comenzó a partir de agosto del 2022, la siembra se realizó colocando una semilla por cavidad en las charolas de propagación, una vez emergidas las plántulas, las charolas se colocaron en el invernadero de producción de plántulas se controló diariamente la humedad del sustrato para determinar cuándo era necesario realizar los riegos y así asegurar el crecimiento y desarrollo adecuado de las plantas. La fertilización de las plántulas se realizó aplicando el fertilizante 18-18-18 cuando las primeras hojas verdaderas surgieron, se aplicó una solución con una concentración de 1 gramo por litro de agua.

#### **3.4.5. Trasplante y aplicación de los tratamientos**

El trasplante de las plántulas se realizó el 10 de septiembre de 2022, en camas que se disponían en doble hilera con una separación de 1.8 m entre ellas, y las plantas se espaciaron a una distancia de 0.5 m entre sí. A lo largo del ciclo de crecimiento de las plantas, se implementó un control constante de plagas, enfermedades y malezas. La

aplicación de nanopartículas se llevó a cabo utilizando la misma técnica que se utilizó en el primer experimento.

### 3.4.6. Fertirriego

Se utilizó un sistema de riego por goteo para proporcionar la solución nutritiva a las plantas, y esta solución se aplicó de manera semanal. El riego se aplicó cuando el tensiómetro tuviera una lectura mayor a 20 cbar. La concentración de la solución nutritiva fue: Nitrógeno 8.0 meq; Fósforo 0.7 meq; Potasio 5.0 meq; Calcio y Magnesio no se aplicaron debido a que se encontraban con alto nivel en el agua de riego.

**Cuadro 5.** Caracterización del agua de pozo utilizada en la preparación de la solución nutritiva.

<b>Características químicas</b>	
C.E.	2.57 dS/m
pH	6.77
Ca <sup>++</sup>	10.6 meq L <sup>-1</sup>
Mg <sup>++</sup>	8.6 meq L <sup>-1</sup>
Na <sup>+</sup>	6.5 meq L <sup>-1</sup>
CO <sup>2+</sup>	0 meq L <sup>-1</sup>
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	8.1 meq L <sup>-1</sup>
Cl <sup>-</sup>	8 meq L <sup>-1</sup>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	9.6 meq L <sup>-1</sup>
Suma de cationes	25.7 meq L <sup>-1</sup>
Suma de Aniones	25.7 meq L <sup>-1</sup>
Salinidad efectiva (SE)	17.6 meq L <sup>-1</sup>
Salinidad potencial (SP)	3.2
Relación absorción de sodio (RAS)	2.10
Carbonato de Sodio Residual (CSR)	0
Porcentaje de Sodio Probable (PSP)	36.93 %
Clasificación	C4S1

### 3.4.7. Aplicación de nanopartículas

Las nanopartículas se aplicaron en tres ocasiones utilizando el mismo procedimiento descrito en el primero experimento. Para dispersar las partículas se utilizó un sonicador

ultrasónica en el laboratorio de química de la FAUANL, este proceso duró 20 minutos y las dosis de nanopartículas fueron (D1-100; D2-300; D3-500 ppm).

#### **3.4.8. Cosecha**

La cosecha de los frutos se efectuó de manera manual el 01 de diciembre de 2022, lo que representó un período de 83 días a partir del momento del trasplante. Este momento se seleccionó cuando los frutos alcanzaron el nivel de madurez adecuado para la cosecha, realizando en total 6 cortes (01/12/2022, 08/12/2022, 15/12/2022, 20/12/2022, 10/01/2023 y 18/01/2023). Posteriormente se separaron las frutas por tratamientos, registrando el peso para la cuantificación del rendimiento.

#### **3.4.9. Variables evaluadas**

##### **3.4.9.1. Altura de la planta (Cm)**

La altura de las plantas se determinó utilizando una cinta métrica, teniendo en cuenta la longitud del tallo desde el nivel del suelo hasta la parte apical. Posteriormente, cada semana, se marcó la rafia en el punto apical y por diferencia de la marca de la semana anterior se determinó el incremento en la altura. Esta variable se evaluó cada 8 días después del trasplante.

##### **3.4.9.2. Diámetro del tallo (mm)**

Para el registro del diámetro del tallo se consideró la parte basal del tallo como punto de referencia para medir el diámetro. Posteriormente, esta variable se midió en la

marca de la rafia de la semana anterior. Las mediciones se realizaron usando un vernier digital de marca Caliper, cada 8 días después del trasplante.

#### **3.4.9.3. Peso del fruto (g)**

Para cuantificar esta variable, se realizó la suma de los pesos de todos los frutos recolectados corte, empleando una balanza de marca Torrey.

#### **3.4.9.4. Diámetro polar de fruto (mm)**

Se midió la longitud de los frutos desde la parte donde se encuentra el pedúnculo hasta la parte apical utilizando un vernier digital de marca Caliper.

#### **3.4.9.5. Diámetro ecuatorial de fruto (mm)**

El diámetro de los frutos se registró utilizando un digital de la marca Calipér

#### **3.4.9.6. Rendimiento**

El rendimiento del tomate en el experimento 2, se registró considerando la totalidad de los frutos pesados en cada una de las fechas de cosecha en cada unidad experimental.

El rendimiento se expresó en kg.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1. Experimento1**

##### **4.1.1 Altura de la planta**

Los análisis de varianza para la altura de planta no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos en la mayoría de las semanas donde se registraron datos. Sin embargo, en la semana del 16 de abril se encontró una interacción significativa entre los tipos de fertilizantes y las dosis. El análisis de comparación de medias mostró diferencia significativa entre las dosis del fertilizante químico con ZnO, encontrando mayor altura en la dosis de 300 ppm. Por otra parte, al comparar las medias de los fertilizantes en cada dosis se observó que, en la dosis alta de 500 ppm, los fertilizantes con base a nanopartículas reportaron mayores alturas (Cuadros 6 y 7), lo que indica que el daño de toxicidad de las nanopartículas a dosis de 500 ppm no influyó en forma negativa en la altura de la planta.

**Cuadro 6.** Comparación de medias de dosis dentro de fertilizantes para incremento de altura de pepino (*Cucumis sativus* L.) "Poinsett 76".

Tipo Fer	Dosis	Media (cm)	Error Est.
ZnSO <sub>4</sub>	100	48.167 ab	3.601
ZnSO <sub>4</sub>	300	56.000 a	3.601
ZnSO <sub>4</sub>	500	41.500 b	3.601
NPs-OSM	100	55.000 a	3.601
NPs-OSM	300	49.000 a	3.601
NPs-OSM	500	57.000 a	3.601
NPs-Zn	100	46.333 a	3.601
NPs-Zn	300	53.667 a	3.601
NPs-Zn	500	53.667 a	3.601

\*Superíndices iguales significa que no hubo diferencia estadística significativa.

De acuerdo con los resultados obtenidos por Fageria *et al.* (2016) en plantas de *Capsicum chinense*, se observaron efectos beneficiosos en el crecimiento cuando se aplicaron nanopartículas de óxido de zinc (NPs ZnO) en concentraciones de 1,000 mg L<sup>-1</sup>, pero se notó un impacto negativo en el crecimiento cuando se utilizó una concentración de 2,000 mg L<sup>-1</sup>. Los resultados positivos de las NPs ZnO pueden explicarse por la importancia del zinc en la realización de actividades metabólicas y catalíticas esenciales para el desarrollo de las plantas, pero en altas concentraciones puede generar fitotoxicidad, como se observó en presente experimento, cuando se aplicaron dosis 500 ppm NPs ZnO.

**Cuadro 7.** Comparación de medias de fertilizantes dentro de dosis para incremento de altura de pepino (*Cucumis sativus* L.) "Poinsett 76.

<b>Tipo Fer</b>	<b>Dosis</b>	<b>Media (cm)</b>	<b>Error Est.</b>
ZnSO <sub>4</sub>	100	48.167 a	3.601
NPs-OSM	100	55.000 a	3.601
NPs-Zn	100	46.333 a	3.601
ZnSO <sub>4</sub>	300	56.000 a	3.601
NPs-OSM	300	49.000 a	3.601
NPs-Zn	300	53.667 a	3.601
ZnSO <sub>4</sub>	500	41.500 b	3.601
NPs-OSM	500	57.000 a	3.601
NPs-Zn	500	53.667 a	3.601

\* Superíndices iguales significa que no hubo diferencia estadística significativa.

De acuerdo con los resultados obtenidos por Rajitha *et al.* (2020) en su estudio, descubrieron que la utilización de 200 ppm de NPs ZnO tuvieron los mejores resultados en términos de germinación de semillas y crecimiento de las plantas (*Cucumis melo* L.). Sin embargo, estos resultados no concuerdan con los resultados obtenidos en este estudio, dado que no se detectaron diferencias sustanciales en los efectos de las diferentes concentraciones de nanopartículas.

#### 4.1.2. Diámetro del tallo

El análisis de varianza para el diámetro del tallo se realizó considerando los factores: tipo de fertilizante, dosis y fechas de muestreo. Las dosis fueron analizadas por medio de polinomios ortogonales, encontrando que el efecto cuadrático fue significativo ( $p = 0.034$ ) posteriormente se realizó la comparación de medias (Cuadro 8), donde se encontró que la dosis de 300 ppm fue superior a la de 500 ppm. Esto se comprobó con el efecto cuadrático en donde se encontró que hay un incremento en el diámetro al pasar de la dosis de 100 a 300 ppm y un decremento al pasar de la dosis 300 a 500 ppm.

**Cuadro 8.** Comparación de medias de dosis para el diámetro de tallo de pepino (*Cucumis sativus* L.) "Poinsett 76.

Dosis ppm	Media (mm)	E. E.	Intervalo de confianza 95%	
			L. I.	L. S.
100	6.257ab	0.090	6.078	6.436
300	6.457a	0.090	6.278	6.636
500	6.182 b	0.090	6.003	6.361

a, b letras iguales significa que no hubo diferencia estadística significativa.

#### 4.1.3. Diámetro de tallo para los tipos de fertilizantes dentro de cada dosis

Los datos del diámetro de tallo se analizaron considerando dos criterios: a) utilizando nueve tratamientos con estructura factorial (tres fertilizantes con tres dosis, Cuadro 9) y b) utilizando los 10 tratamientos (Cuadro 10). La interacción entre tipos de fertilizante y dosis para el diámetro del tallo resultó significativa, por lo que se compararon las medias de un factor dentro del otro. La comparación de medias de fertilizantes dentro de dosis para el diámetro de tallo (Cuadro 9), mostró diferencias significativas entre

los fertilizantes en la dosis de 500 ppm. El tratamiento con NPs inorgánicas tuvo mayor diámetro de tallo que el de NP-OSM.

De acuerdo con los resultados obtenidos por Fageria *et al.* (2016) en plantas de *Capsicum chinense*, se observó que las aplicaciones foliares de nanopartículas en una concentración de 1,000 mg L<sup>-1</sup> tuvieron un impacto positivo en el aumento del diámetro del tallo, mientras que una concentración de 2,000 mg L<sup>-1</sup> tuvo un efecto negativo en esta variable. En la presente investigación las NPs orgánicas tuvieron menor diámetro de tallo, comparadas con las NPs orgánicas en dosis de 500 ppm. Respecto al efecto negativos de la aplicación de NPs, en pepino se encontró toxicidad con dosis de 500 ppm.

**Cuadro 9.** Comparación de medias de diámetro de tallo para los tipos de fertilizantes dentro de cada dosis.

Dosis (ppm)	Tipo de Fertilizante	Media (mm)
100	ZnSO <sub>4</sub>	6.158 a
	NPs-ZnO orgánicas	6.413 a
	NPs-ZnO inorgánicas	6.200 a
300	ZnSO <sub>4</sub>	6.525 a
	NPs-ZnO orgánicas	6.225 a
	NPs-ZnO inorgánicas	6.621 a
500	ZnSO <sub>4</sub>	6.075 ab
	NPs-ZnO orgánicas	5.979 b
	NPs-ZnO inorgánicas	6.492 a

a, b letras iguales significa que no hubo diferencia estadística significativa.

#### 4.1.4. Diámetro de tallo considerando los 10 tratamientos

El análisis de varianza para los diez tratamientos mostró diferencias altamente significativas ( $p=0.004$ ). Al realizar la comparación de promedios, se observó que el testigo mostró el diámetro de tallo más pequeño, y con diferencias significativas con los tratamientos NP-Zn en dosis de 300 y 500 ppm, también el testigo tuvo menor diámetro del tallo que el tratamiento  $ZnSO_4$  en dosis de 300 ppm y a NP-OSM en dosis de 500 ppm (Cuadro 10).

**Cuadro 10.** Comparación de medias del diámetro de tallo de pepino (*Cucumis sativus* L.) "Poinsett 76 considerando los 10 tratamientos.

Tratamiento	Media (cm)	Error estándar
$ZnSO_4$ 100	6.158 abcd	0.139
$ZnSO_4$ 300	6.525 ab	0.139
$ZnSO_4$ 500	6.075 bcd	0.139
NP <sub>s</sub> -OSM 100	6.413 abcd	0.139
NP <sub>s</sub> -OSM 300	6.225 abcd	0.139
NP <sub>s</sub> -OSM 500	5.979 cd	0.139
NP <sub>s</sub> -Zn 100	6.200 abcd	0.139
NP <sub>s</sub> -Zn 300	6.621 a	0.139
NP <sub>s</sub> -Zn 500	6.492 abc	0.139
Testigo	5.921 d	0.139

a, b, c, d, e *letras iguales significa que no hubo diferencia estadística significativa.*

#### 4.1.5. Días a floración

Los días a floración promedio de las plantas por unidad experimental estuvieron en el rango entre 19.5 y 25.0 días. El análisis de varianza realizado para esta variable no reveló diferencias estadísticamente significativas entre los diversos tratamientos ( $p = 0.851$ ). Las medias se presentan en el Cuadro 11. Los días a floración obtenidos son menores que los reportados por Rubén *et al.* (2021) en este estudio, se encontró

que el proceso de floración en el pepino ocurrió aproximadamente a los  $33.4 \pm 0.9$  días, y no se observaron diferencias significativas tanto entre diferentes híbridos como entre los diversos métodos de poda utilizados en el cultivo.

**Cuadro 11.** Medias de días a floración de pepino (*Cucumis sativus* L.) "Poinsett 76"

Tratamiento	Media	Error estándar	Intervalo de confianza 95%	
			L. I.	L. S.
ZnSO <sub>4</sub> 100	21.333	0.941	19.370	23.297
ZnSO <sub>4</sub> 300	20.833	0.941	18.870	22.797
ZnSO <sub>4</sub> 500	22.500	0.941	20.536	24.464
NPs-OSM 100	22.333	0.941	20.370	24.297
NPs-OSM 300	22.333	0.941	20.370	24.297
NPs-OSM 500	22.333	0.941	20.370	24.297
NPs-Zn 100	23.000	0.941	21.036	24.964
NPs-Zn 300	22.000	0.941	20.036	23.964
NPs-Zn 500	22.667	0.941	20.703	24.630
Testigo	22.833	0.941	20.870	24.797

#### 4.1.6. Número de frutos y peso del fruto

En el análisis de varianza, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en lo que respecta al número de frutos, aunque considerando una significancia de 0.10, se pudieran considerar diferentes significativamente. El tratamiento que registró la cantidad más alta de frutos fue el de NPs orgánicas en concentraciones de 500 ppm.

El peso de fruto mostró diferencias significativas, encontrando. El testigo mostró un rendimiento menor en comparación con los demás tratamientos, demostrando con esto que los tratamientos con nanopartículas y ZnSO<sub>4</sub> tuvieron un efecto positivo sobre el

peso individual de frutos (Cuadro 12). Al comparar los tratamientos de nanopartículas orgánicas, inorgánicas y el fertilizante químico ( $ZnSO_4$ ) en cuanto al peso de fruto, no se encontraron diferencias significativas entre los tipos de fertilizantes. Considerando estos resultados se concluye que las nanopartículas no tuvieron un efecto importante sobre el rendimiento comparadas con un fertilizante químico.

**Cuadro 12.** Comparación de medias de peso de fruto de pepino (*Cucumis sativus* L.) "Poinsett 76".

Tratamiento	Media (kg)	Error estándar	Intervalo de confianza (95%)	
			L. I.	L. S.
ZnSO <sub>4</sub> 100	6.137 a	0.822	4.422	7.851
ZnSO <sub>4</sub> 300	6.667 a	0.822	4.952	8.381
ZnSO <sub>4</sub> 500	5.153 a	0.822	3.439	6.868
NPs-OSM 100	5.810 a	0.822	4.095	7.525
NPs-OSM 300	4.597 a	0.822	2.882	6.311
NPs-OSM 500	6.230 a	0.822	4.515	7.945
NPs-Zn 100	5.253 a	0.822	3.539	6.968
NPs-Zn 300	5.983 a	0.822	4.269	7.698
NPs-Zn 500	6.970 a	0.822	5.255	8.685
Testigo	3.203 b	0.822	1.489	4.918

\*\* Superíndices iguales significa hubo diferencia estadística significativas.

Las variables de peso de fruto y número de frutos fueron analizadas por medio de componentes principales, en donde se encontró un solo componente (nueva variable) que explica en un 93.5 % la variabilidad conjunta de las dos variables. Las correlaciones de la nueva variable con el peso y número de frutos fueron de 0.967 y 0.967, respectivamente. Al realizar el análisis de varianza con la nueva variable (PF+NF) se encontró diferencia significativa entre los tratamientos, en donde los tratamientos ZnSO<sub>4</sub> 300 ppm, NPs-OSM 500 ppm y NPs-Zn 500 ppm resultaron con los mayores valores de peso y número de frutos analizados en forma conjunta (Cuadro 13).

**Cuadro 13.** Comparación de medias de PF+NFs de pepino (*Cucumis sativus* L.) "Poinsett 76".

Tratamiento	Media (Kg)	Error estándar	Intervalo de confianza (95%)	
			L. I.	L. S.
ZnSO <sub>4</sub> 100	0.239 ab	0.491	-.789	1.267
ZnSO <sub>4</sub> 300	0.672 ab	0.491	-.356	1.700
ZnSO <sub>4</sub> 500	-.245 abc	0.491	-1.273	0.783
NPs-OSM 100	-.177 abc	0.491	-1.205	0.852
NPs-OSM 300	-.738 b	0.491	-1.766	0.290
NPs-OSM 500	0.627 ab	0.491	-.402	1.655
NPs-Zn 100	0.490 ab	0.602	-.769	1.749
NPs-Zn 300	0.085 ab	0.491	-.943	1.113
NPs-Zn 500	0.774 a	0.491	-.254	1.802
Testigo	-1.564 c	0.491	-2.592	-.536

\*\* Superíndices iguales significa hubo diferencia estadística significativas.

#### 4.1.7. Diámetro del fruto

El diámetro de frutos fue analizado mediante un análisis de varianza, considerando los tipos de fertilizantes, dosis e interacción, encontrando que no hubo efectos significativos (Cuadro 14). También se realizó un análisis de varianza con los 10 tratamientos, encontrando los mismos resultados. Las medias de los 10 tratamientos se presentan en el Cuadro 14.

**Cuadro 14.** Comparación de media del diámetro de fruto de pepino (*Cucumis sativus* L.) “Poinsett 76” dentro de los tratamientos.

Tratamiento	Media (mm)	Error estándar	Intervalo de confianza (95%)	
			L. I.	L. S.
ZnSO <sub>4</sub> 100	58.804	1.443	55.772	61.836
ZnSO <sub>4</sub> 300	60.328	1.443	57.296	63.360
ZnSO <sub>4</sub> 500	56.469	1.443	53.438	59.501
NPs-OSM 100	58.111	1.443	55.080	61.143
NPs-OSM 300	60.437	1.443	57.405	63.468
NPs-OSM 500	58.718	1.443	55.686	61.750
NPs-Zn 100	60.363	1.443	57.331	63.395
NPs-Zn 300	59.184	1.443	56.153	62.216
NPs-Zn 500	59.838	1.443	56.806	62.869
Testigo	57.458	1.443	54.427	60.490

*Superíndices iguales significa hubo diferencia estadística significativas.*

Los diámetros de fruto obtenidos en esta investigación fueron mayores a los reportados por Shaw *et al.* (2017) quienes obtuvieron diámetros en el rango de 3.80 y 4.4 cm. En investigaciones anteriores sobre el cultivo de pepino en ambientes controlados como invernaderos, investigadores lograron diámetros de fruto que oscilaron entre 2.64 y 2.77 cm (Hochmuth *et al.*, 2016). Así mismo, en otro análisis, se identificó un intervalo de valores entre 2.84 y 3.51 milímetros para esta característica, y en una investigación diferente, se registraron mediciones dentro del rango de 3.50 a 3.70 cm (Jasso- Chaverria *et al.*, 2015). Por otro lado, algunos otros investigadores

observaron que el diámetro del fruto varió en un rango comprendido entre 4.60 y 5.80 cm (Gómez-López *et al.*, 2016).

En la mayoría de las investigaciones citadas, los resultados de diámetro de frutos son inferiores a los obtenidos en la presente evaluación de nanopartículas. Las diferencias en los resultados podrían atribuirse posiblemente a factores como el tipo de cultivo, las prácticas agrícolas empleadas, el sistema de riego, la estrategia de fertilización, la densidad de plantación adoptada o el momento en el que se llevó a cabo la cosecha de los frutos.

#### 4.1.8. Longitud del fruto

El análisis de varianza para longitud del fruto resultó con diferencias significativas ( $p=0.013$ ). La comparación de medias mostró que el testigo tuvo las menores longitudes, por lo que el aporte de Zn en forma de nanopartículas o químico incrementó la longitud. Los resultados también mostraron diferencia significativa entre los niveles de 100 ppm y 300 ppm de Zn, aplicados en forma química (Cuadro 15). El análisis de varianza relacionado con la longitud de los frutos considerando los factores de tipo de fertilizante y dosis resultó con diferencias no significativas en los efectos principales e interacción.

**Cuadro 15.** Comparación de media de la longitud del fruto de pepino (*Cucumis sativus* L.) "Poinsett 76" dentro de los tratamientos.

Tratamiento	Media (Cm)	Error estándar	Intervalo de confianza (95%)	
			L. I.	L. S.
ZnSO <sub>4</sub> 100	21.550 b	0.649	20.196	22.904
ZnSO <sub>4</sub> 300	23.845 a	0.649	22.490	25.199
ZnSO <sub>4</sub> 500	21.940 ab	0.649	20.585	23.294
NPs-OSM 100	22.380 ab	0.649	21.026	23.734
NPs-OSM 300	22.156 ab	0.649	20.801	23.510
NPs-OSM 500	23.217 ab	0.649	21.862	24.571
NPs-Zn 100	22.967 ab	0.649	21.612	24.321
NPs-Zn 300	23.147 ab	0.649	21.792	24.501
NPs-Zn 500	22.581 ab	0.649	21.227	23.935
Testigo	19.616 c	0.649	18.261	20.970

(a, b) Letras diferentes muestran diferencias estadísticas significativas ( $p \leq 0.05$ ).

Las longitudes de fruto obtenidas fueron superiores a las reportadas por Nelson *et al.* (2018), quienes obtuvieron frutos con promedio de longitudes entre 16 y 17, cm.

#### 4.1.9. Peso fresco y seco del tallo

Los resultados de las variables de biomasa son presentados en los Cuadros 16 y 17. El peso fresco del tallo resultó con diferencias significativas en el análisis de varianza ( $p=0.027$ ). La comparación de medias mostró el menor peso en el tratamiento testigo. Los mayores pesos se encontraron en los tratamientos  $ZnSO_4$  100 y NPs-Zn 500 (Cuadro 16).

Los resultados concuerdan con De la Rosa *et al.* (2013) quienes reportan un aumento del 35% en la producción de biomasa en comparación con el control en las plántulas de tomate al aplicar  $800 \text{ mg L}^{-1}$  de nanopartículas de óxido de zinc (NPs de ZnO).

**Cuadro 16.** Comparación de media para el peso fresco del tallo de pepino (*Cucumis sativus* L.) "Poinsett 76".

Tratamiento	Media (kg)	Error estándar	Intervalo de confianza (95%)	
			L. I.	L. S.
$ZnSO_4$ 100	0.172 a	0.013	0.144	0.199
$ZnSO_4$ 300	0.142 abc	0.013	0.114	0.169
$ZnSO_4$ 500	0.115 bc	0.013	0.087	0.143
NPs-OSM 100	0.128 abc	0.013	0.101	0.156
NPs-OSM 300	0.117 bc	0.013	0.089	0.144
NPs-OSM 500	0.158 ab	0.013	0.131	0.186
NPs-Zn 100	0.133 abc	0.013	0.106	0.161
NPs-Zn 300	0.138 abc	0.013	0.111	0.166
NPs-Zn 500	0.162 a	0.013	0.134	0.189
Testigo	0.103 c	0.013	0.076	0.131

(a, b, c) Letras diferentes muestran diferencias estadísticas significativas ( $p \leq 0.05$ ).

#### 4.1.10. Peso seco del tallo

El peso seco del tallo resultó con diferencias significativas en el análisis de varianza ( $p=0.027$ ). La comparación de medias mostró el menor peso en el tratamiento testigo. El tratamiento que mostró el peso más alto fue NPs-Zn 500 y los menores pesos en los tratamientos NPs-OSM 300 ppm y testigo (Cuadro 17).

**Cuadro 17.** Comparación de medias para el peso seco del tallo de pepino (*Cucumis sativus* L.) "Poinsett 76".

Tratamiento	Media (kg)	Error estándar	Intervalo de confianza (95%)	
			L. I.	L. S.
ZnSO <sub>4</sub> 100	0.059 abc	0.006	0.045	0.072
ZnSO <sub>4</sub> 300	0.060 abc	0.006	0.046	0.074
ZnSO <sub>4</sub> 500	0.045 bc	0.006	0.032	0.059
NPs-OSM 100	0.049 abc	0.006	0.035	0.062
NPs-OSM 300	0.042 c	0.006	0.029	0.056
NPs-OSM 500	0.064 ab	0.006	0.051	0.078
NPs-Zn 100	0.045 bc	0.006	0.031	0.059
NPs-Zn 300	0.057 abc	0.006	0.043	0.070
NPs-Zn 500	0.068 a	0.006	0.055	0.082
Testigo	0.038 c	0.006	0.025	0.052

(a, b, c) Letras diferentes muestran diferencias estadísticas significativas ( $p \leq 0.05$ ).

Los resultados de la investigación concuerdan con los resultados reportados por De la Rosa *et al.* (2013), Aquellos que informaron de un incremento del 35% en la producción de biomasa en comparación con el grupo de control fueron aquellos que aplicaron 800 mg L<sup>-1</sup> de nanopartículas de óxido de zinc (NPs ZnO) en las plántulas de tomate. En otro estudio, Panwar *et al.* (2012) se observó un incremento significativo en el crecimiento y la producción de biomasa seca en las plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*) al aplicar directamente 20 mg L<sup>-1</sup> de NPs-ZnO sobre las hojas. Esto resultó en una mayor concentración de zinc en las hojas, lo que confirma que se

produjo la absorción a través de los estomas y su transporte hacia abajo a través del floema.

#### 4.1.11. Peso fresco y seco de las hojas

El peso fresco de las hojas fue obtenido a partir de una muestra extraída al finalizar el experimento, el peso fresco reportó variabilidad dentro de los tratamientos, por lo que no se encontraron diferencias significativas ( $p = 0.175$ ). De igual manera, los pesos secos de hoja registraron la misma tendencia que los pesos frescos, por lo que no se encontraron diferencias significativas ( $p = 0.187$ ). Las medias de los tratamientos para los pesos fresco y seco de hojas se presentan en los Cuadros 18 y 19.

**Cuadro 18.** Medias del peso fresco de las hojas de pepino (*Cucumis sativus* L.) "Poinsett 76".

Tratamiento	Media (kg)	Error estándar	Intervalo de confianza (95%)	
			L. I.	L. S.
ZnSO <sub>4</sub> 100	0.188	0.021	0.146	0.231
ZnSO <sub>4</sub> 300	0.140	0.021	0.097	0.183
ZnSO <sub>4</sub> 500	0.132	0.021	0.089	0.174
NPs-OSM 100	0.137	0.021	0.094	0.179
NPs-OSM 300	0.135	0.021	0.092	0.178
NPs-OSM 500	0.165	0.021	0.122	0.208
NPs-Zn 100	0.143	0.021	0.101	0.186
NPs-Zn 300	0.138	0.021	0.096	0.181
NPs-Zn 500	0.178	0.021	0.136	0.221
Testigo	0.097	0.021	0.054	0.139

\*\* Superíndices iguales significa hubo diferencia estadística significativas.

**Cuadro 19.** Medias del peso seco de las hojas de pepino (*Cucumis sativus* L.) “Poinsett 76”.

Tratamiento	Media (kg)	Error estándar	Intervalo de confianza (95%)	
			L. I.	L. S.
ZnSO <sub>4</sub> 100	0.020	0.002	0.015	0.024
ZnSO <sub>4</sub> 300	0.021	0.002	0.016	0.025
ZnSO <sub>4</sub> 500	0.014	0.002	0.009	0.018
NPs-OSM 100	0.018	0.002	0.013	0.022
NPs-OSM 300	0.014	0.002	0.009	0.019
NPs-OSM 500	0.017	0.002	0.012	0.022
NPs-Zn 100	0.020	0.002	0.015	0.024
NPs-Zn 300	0.017	0.002	0.012	0.022
NPs-Zn 500	0.022	0.002	0.018	0.027
Testigo	0.015	0.002	0.011	0.020

*Superíndices iguales significa hubo diferencia estadística significativas.*

#### 4.1.12. Peso fresco y seco de raíces

Los análisis de varianza para el peso fresco y seco de raíz no tuvieron diferencias significativas entre tratamientos. Los resultados fueron muy variables dentro de los tratamientos debido a que una parte de las raíces de las dos plantas estaban mezcladas al fondo del contenedor, por lo que no fue posible determinar con exactitud el peso de la raíz de cada planta. En el Cuadro 20 se presentan las medias de los pesos frescos y secos de raíz.

En otras investigaciones se han reportado resultados positivos sobre el crecimiento de raíces utilizando NPs, como en el trabajo de Zhao *et al.* (2014), quienes reportaron en plantas de pepino (*Cucumis sativus* L) se observaron aumentos significativos en la longitud de las raíces y en la cantidad de biomasa seca de las raíces cuando se añadieron al suelo cantidades de 400 y 800 mg kg<sup>-1</sup> de NPs-ZnO. También Jurkow *et al.* (2020) reportaron una buena respuesta en el peso fresco de raíces de lechuga al aplicar 20 ppm (NPs Ag).

**Cuadro 20.** Peso fresco y seco de la raíz de pepino (*Cucumis sativus* L.) "Poinsett 76".

Tratamiento	Peso R Fresco	Peso R Seco
ZnSO <sub>4</sub> 100	2.133	0.700
ZnSO <sub>4</sub> 300	1.367	0.500
ZnSO <sub>4</sub> 500	1.683	0.875
NPs-OSM 100	1.467	0.733
NPs-OSM 300	2.917	1.067
NPs-OSM 500	2.100	0.600
NPs-Zn 100	2.150	0.650
NPs-Zn 300	1.950	0.783
NPs-Zn 500	1.950	0.717
Testigo	1.233	0.533

La aplicación de nanopartículas ha tenido efectos positivos en el crecimiento de las raíces, de manera similar a los hallazgos alcanzados mediante la aplicación de 1.5 y 10 ppm de NPs-ZnO a plántulas de garbanzo (*Cicer arietinum*) por vía foliar, ya que provocaron un aumento significativo tanto en la longitud como en la cantidad de biomasa seca (Karami *et al.*, 2015). En términos generales, diversos estudios han resaltado que el uso de nanofertilizantes de zinc promueve el desarrollo de las raíces. Burman *et al.* (2013) se ha planteado que este estímulo al crecimiento se atribuye a la relevante función del zinc como cofactor enzimático en procesos fotosintéticos y en la preservación de la integridad de las membranas celulares de las plantas.

#### 4.1.13. Análisis de nutrientes en las hojas de pepino

##### 4.1.13.1. Nitrógeno (N)

El análisis de varianza para la concentración foliar de nitrógeno mostró diferencias significativas entre los tratamientos. En los tratamientos de NPs de Zn (500) y ZnSO<sub>4</sub> (100) se encontraron las mayores concentraciones de N en la hoja (Cuadro 21).

En una investigación realizado por Gómez *et al.* (2003) en el caso del pepino, en lo que respecta a la asimilación de macronutrientes, se observó que la captación de nitrógeno (N) y potasio (K) superó la captación de fósforo (P). en el tratamiento con nanopartículas, lo que está en concordancia con lo obtenido en esta investigación.

**Cuadro 21.** Comparación de medias de concentración foliar de N para nanopartículas de diferentes dosis.

Tratamiento	Media (%)	Error estándar	Intervalo de confianza (95%)	
			L. I.	L. S.
ZnSO <sub>4</sub> 100	3.159 ab	0.196	2.751	3.567
ZnSO <sub>4</sub> 300	2.445 c	0.196	2.336	3.152
ZnSO <sub>4</sub> 500	2.562 c	0.196	2.154	2.970
NPs-OSM 100	2.627 bc	0.196	2.219	3.035
NPs-OSM 300	2.781 bc	0.196	2.373	3.189
NPs-OSM 500	2.828 abc	0.196	2.420	3.236
NPs-Zn 100	2.674 bc	0.196	2.266	3.082
NPs-Zn 300	2.646 bc	0.196	2.238	3.054
NPs-Zn 500	3.309 a	0.196	2.901	3.717
Testigo	2.688 bc	0.196	2.280	3.096

#### 4.1.13.2. Fosforo (P)

El análisis de varianza para la concentración foliar de fósforo mostró diferencias significativas entre los tratamientos (Cuadro 22). Los tratamientos con las mayores concentraciones de P fueron los que contenían Zn, principalmente las dosis de 300 y 500 ppm de ZnSO<sub>4</sub> y NPs ZnO. La interacción P-Zn en la mayoría de las plantas ocurre debido a que altas dosis de P inhiben la absorción de Zn.

**Cuadro 22.** Concentración foliar de P para tratamientos.

Tratamiento	Media (%)	Error estándar	Intervalo de confianza (95%)	
			L. I.	L. S.
ZnSO <sub>4</sub> 100	0.266 bc	0.021	0.221	0.311
ZnSO <sub>4</sub> 300	0.345 a	0.021	0.300	0.390
ZnSO <sub>4</sub> 500	0.329 ab	0.021	0.284	0.374
NPs-OSM 100	0.331 ab	0.021	0.286	0.376
NPs-OSM 300	0.254 c	0.021	0.209	0.299
NPs-OSM 500	0.336 ab	0.021	0.291	0.381
NPs-Zn 100	0.301 abc	0.021	0.256	0.346
NPs-Zn 300	0.336 ab	0.021	0.291	0.381
NPs-Zn 500	0.336 ab	0.021	0.291	0.381
Testigo	0.262 bc	0.026	0.207	0.317

#### 4.1.13.3. Potasio (K)

Los análisis de varianza para la concentración foliar de potasio no mostraron efectos significativos entre los tratamientos, lo que indica que las aplicaciones de Zn en forma de nanopartículas o sulfato de Zn no influyeron en la concentración foliar de K (Cuadro 23).

**Cuadro 23.** Madias de concentración foliar de K para nanopartículas con diferentes dosis.

Tratamiento	Media (%)	Error estándar	Intervalo de confianza (95%)	
			L. I.	L. S.
ZnSO <sub>4</sub> 100	1.459	0.161	1.123	1.795
ZnSO <sub>4</sub> 300	1.558	0.161	1.222	1.894
ZnSO <sub>4</sub> 500	1.289	0.161	0.952	1.625
NPs-OSM 100	1.355	0.161	1.019	1.692
NPs-OSM 300	1.301	0.161	0.965	1.638
NPs-OSM 500	1.400	0.161	1.064	1.736
NPs-Zn 100	1.222	0.161	0.886	1.558
NPs-Zn 300	1.273	0.161	0.936	1.609
NPs-Zn 500	1.255	0.161	0.919	1.592
Testigo	1.362	0.161	1.026	1.698

#### 4.1.13.4. Magnesio (Mg)

Los análisis de varianza para la concentración foliar de magnesio no mostraron efectos significativos para los tratamientos, indicando que las nanopartículas no incrementaron de Mg en la hoja de diferentes dosis de nanopartículas (Cuadro 24).

**Cuadro 24:** Madias de concentración foliar de Mg para nanopartículas con diferentes dosis.

Tratamiento	Media (%)	Error estándar	Intervalo de confianza (95%)	
			L. I.	L. S.
ZnSO <sub>4</sub> 100	0.754	0.059	0.630	0.878
ZnSO <sub>4</sub> 300	0.702	0.059	0.578	0.826
ZnSO <sub>4</sub> 500	0.897	0.059	0.774	1.021
NPs-OSM 100	0.759	0.059	0.635	0.882
NPs-OSM 300	0.771	0.059	0.647	0.895
NPs-OSM 500	0.739	0.059	0.615	0.863
NPs-Zn 100	0.754	0.059	0.630	0.877
NPs-Zn 300	0.772	0.059	0.648	0.896
NPs-Zn 500	0.743	0.059	0.619	0.867
Testigo	0.643	0.059	0.519	0.767

#### 4.1.13.5. Calcio (Ca)

El análisis de varianza para la concentración foliar de Calcio (Ca) mostró diferencias significativas ( $p=0.05$ ) entre los fertilizantes (Cuadro 25), observándose mayor concentración en el fertilizante 3 con nanopartículas de zinc (NPs-Zn).

En un estudio realizado por Héctor *et al.* (2022) en el cultivo de higo, se observó que hubo diferencias significativas en la concentración mineral de las hojas en cuanto a calcio (Ca) y magnesio (Mg), pero no en el caso del potasio (K). Dentro de los distintos tratamientos, se tuvieron las nanopartículas de hidroxiapatita ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ ) y el producto comercial Neostren (Ca + Si) presentaron los niveles más altos de concentración de calcio, y además, el producto comercial Neostren también mostró una concentración superior de magnesio.

**Cuadro 25.** Comparación de medias de concentración foliar de Ca para nanopartículas de diferentes fertilizantes.

Fertilizante	Media (%)	Error estándar	Intervalo de confianza (95%)	
			L. I.	L. S.
ZnSO <sub>4</sub>	3.755 b	0.283	3.160	4.350
NPs-OSM	3.409 b	0.283	2.814	4.004
NPs-ZnO	4.819 a	0.283	4.224	5.414

**Cuadro 26.** Análisis de varianza (ANVA) de la concentración foliar de Calcio (Ca).

FV	SC	GL	CM	F	Sig.
Fertilizante	9.712	2	4.856	6.728	0.007
Dosis	0.173	2	0.086	0.120	0.888
Fertilizante * Dosis	4.172	4	1.043	1.445	0.260
Error	12.992	18	0.722		
Total	457.844	27			
Total, corregido	27.048	26			

#### 4.1.13.6. Zinc (Zn)

Los análisis de varianza para la concentración foliar de zinc no mostraron efectos significativos para los tratamientos de diferentes dosis de nanopartículas (Cuadro 27).

Los resultados fueron muy variables dentro de los fertilizantes, por lo que no fue posible determinar las diferencias entre los tratamientos en cuanto a la concentración de Zn en el tejido foliar.

**Cuadro 27.** Comparación de medias de concentración foliar de Zn para nanopartículas de diferentes dosis.

Tratamiento	Media (%)	Error estándar	Intervalo de confianza (95%)	
			L. I.	L. S.
ZnSO <sub>4</sub> 100	47.520	4.506	38.012	57.028
ZnSO <sub>4</sub> 300	54.585	4.506	45.077	64.093
ZnSO <sub>4</sub> 500	61.425	3.680	53.662	69.188
NPs-OSM 100	52.845	3.680	45.082	60.608
NPs-OSM 300	46.185	3.680	38.422	53.948
NPs-OSM 500	49.530	3.680	41.767	57.293
NPs-Zn 100	47.910	3.680	40.147	55.673
NPs-Zn 300	55.440	3.680	47.677	63.203
NPs-Zn 500	48.240	3.680	40.477	56.003
Testigo	46.260	4.506	36.752	55.768

#### 4.1.14. Grado °Brix

El análisis de varianza para °Brix en el fruto de pepino mostró efectos significativos para la interacción de los factores de fertilizantes y dosis de nanopartículas. Las dosis tuvieron efectos significativos ( $p \leq 0.05$ ), con respecto a ° Brix, encontrando en los tratamientos de NPs-OSM 100 y NPs-OSM 500 valores más altos comparados con el tratamiento control (Cuadro 28).

De acuerdo con los resultados obtenidos por Davarpanah *et al.* (2016), llevaron a cabo el estudio indicaron que la aplicación de nanofertilizantes de óxido de zinc (NPs-ZnO) mediante la pulverización de las hojas a una concentración de 120 mg L<sup>-1</sup> produjo mejoras notables en la calidad de los frutos de granada. Estas mejoras incluyeron un aumento del 4.4-7.6% en el contenido de sólidos solubles (°Brix), una disminución del 9.5-29.1% en la acidez titulable (TA), un aumento del 20.6-46.1% en el índice de madurez y un incremento del 0.28-0.62% en el pH del jugo. Sin embargo, no se observaron cambios en las características físicas de los frutos.

**Cuadro 28.** Comparación de medias de grado °Brix en la fruta de pepino.

Tratamiento	Media °Brix	Error estándar	Intervalo de confianza (95%)	
			L. I.	L. S.
ZnSO <sub>4</sub> 100	3.133 c	0.457	2.179	4.087
ZnSO <sub>4</sub> 300	3.867 bc	0.457	2.913	4.821
ZnSO <sub>4</sub> 500	3.367 bc	0.457	2.413	4.321
NPs-OSM 100	5.500 a	0.457	4.546	6.454
NPs-OSM 300	3.067 c	0.457	2.113	4.021
NPs-OSM 500	4.767 ab	0.457	3.813	5.721
NPs-Zn 100	4.033 bc	0.457	3.079	4.987
NPs-Zn 300	2.733 c	0.457	1.779	3.687
NPs-Zn 500	2.900 c	0.457	1.946	3.854
Testigo	3.833 bc	0.457	2.879	4.787

**Cuadro 29.** Análisis de varianza (ANVA) para el grado Brix en el fruto de pepino.

FV	SC	GL	CM	F	Sig.
Tratamientos	20.815	9	2.313	3.685	0.007
Error	12.553	20	0.628		
Total	448.520	30			
Total, corregido	33.368	29			

#### 4.1.15. Rendimiento

Los resultados obtenidos en las variables agronómicas relacionadas al rendimiento del cultivo de pepino son presentados en el Cuadro 30. El análisis de varianza para el peso de frutos individuales tuvo diferencia significativa ( $p=0.000$ ). La comparación de medias mostró que el tratamiento con el menor peso de fruto fue el testigo, sobresaliendo los tratamientos con nanopartículas, especialmente los que contenían NPs de ZnO.

**Cuadro 30.** Comparación de medias de peso individual de frutos de pepino aplicando diferentes dosis de nanopartículas de ZnO bajo condición invernadero.

Tratamiento	Media (Kg)	Error estándar	Intervalo de confianza (95%)	
			L. I.	L. S.
ZnSO <sub>4</sub> 100	0.422 ab	0.016	0.390	0.454
ZnSO <sub>4</sub> 300	0.454 a	0.015	0.425	0.483
ZnSO <sub>4</sub> 500	0.406 ab	0.018	0.371	0.442
NPs-OSM 100	0.388 bc	0.015	0.359	0.418
NPs-OSM 300	0.437 ab	0.018	0.402	0.473
NPs-OSM 500	0.356 cd	0.015	0.327	0.386
NPs-Zn 100	0.424 ab	0.016	0.392	0.457
NPs-Zn 300	0.428 ab	0.016	0.396	0.460
NPs-Zn 500	0.410 ab	0.015	0.381	0.439
Testigo	0.328 d	0.018	0.293	0.363

De acuerdo con los resultados obtenidos por Wang *et al.* (2014), los investigadores concluyeron que el uso de nanopartículas de óxido de cerio (CeO<sub>2</sub>-NPs) en diversas concentraciones (de 0.1 a 10 mg L<sup>-1</sup>) tuvo un impacto beneficioso en el desempeño de los tomates, especialmente en el crecimiento de las plantas y la cantidad de frutos producidos. También los resultados alcanzados por Khanm *et al.* (2017), fueron similares, cuando se aplicaron 1000 mg L<sup>-1</sup> de NPs-ZnO a las plantas de tomate, se notó un aumento notable en el crecimiento de la planta, la producción y la acumulación de zinc en comparación con el zinc sulfato (ZnSO<sub>4</sub>) y el testigo.

La cosecha de frutos se realizó en cinco fechas, por lo que se tomaron los pesos de los frutos y se sumaron sobre las cinco fechas de recolección. El rendimiento obtenido por unidad experimental se analizó estadísticamente con un análisis de varianza, resultando no significativo, aunque los menores rendimientos se observaron en el tratamiento testigo. El rendimiento fue muy variable dentro de los tratamientos debido a que varió el número de frutos cosechados (Cuadro 31).

**Cuadro 31.** Rendimiento de pepino aplicando diferentes dosis de nanopartículas de ZnO bajo condición invernadero.

Tratamiento	Media (Kg)	Error estándar	Intervalo de confianza (95%)	
			L. I.	L. S.
ZnSO4 100	5.777	1.067	3.535	8.018
ZnSO4 300	7.720	1.067	5.478	9.962
ZnSO4 500	4.607	1.067	2.365	6.848
NPs-OSM 100	6.333	1.067	4.092	8.575
NPs-OSM 300	4.953	1.067	2.712	7.195
NPs-OSM 500	5.940	1.067	3.698	8.182
NPs-Zn 100	5.803	1.067	3.562	8.045
NPs-Zn 300	6.003	1.067	3.762	8.245
NPs-Zn 500	6.853	1.067	4.612	9.095
Testigo	3.840	1.067	1.598	6.082

## 4.2. Experimento 2. Tomate

### 4.2.1. Altura de la planta

Los análisis de varianza realizados en relación con la altura de las plantas no mencionaron diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes tratamientos en las semanas donde se colectaron datos de esta variable. Las medias de altura en los tratamientos se presentan en el Cuadro 32.

Los resultados son similares a los encontrados en un estudio realizado por (Panwar *et al.*, 2012) durante el estudio, se observó que no hubo diferencias significativas en la altura de las plantas en los tratamientos que emplearon nanopartículas de óxido de zinc mediante diversas formas de aplicación durante el cultivo de tomate. Esto difiere con lo reportado con Sheoran *et al.* (2021) se menciona que la utilización de una concentración de  $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de NPs-ZnO condujo a un aumento en la altura de las plantas, la producción y la acumulación de biomasa en *Triticum aestivum*. A pesar de que la cantidad utilizada fue superior, se pudo observar un efecto beneficioso de las nanopartículas.

**Cuadro 32.** Medias de altura de tomate en tratamientos de nanopartículas con diferentes dosis.

Tratamiento	Media (Cm)	Error estándar	Intervalo de confianza (95%)	
			L. I.	L. S.
ZnSO <sub>4</sub> 100	258.031	7.196	242.969	273.093
ZnSO <sub>4</sub> 300	246.111	5.507	234.586	257.637
ZnSO <sub>4</sub> 500	244.563	5.441	233.174	255.951
NPs-OSM 100	238.093	5.674	226.217	249.969
NPs-OSM 300	249.622	5.711	237.669	261.576
NPs-OSM 500	243.210	5.420	231.866	254.554
NPs-Zn 100	246.935	5.430	235.570	258.301
NPs-Zn 300	248.721	6.143	235.863	261.579
NPs-Zn 500	251.014	5.419	239.672	262.355
Testigo	245.700	5.454	234.285	257.114

#### 4.2.2. Diámetro del tallo

El análisis estadístico del diámetro del tallo encontró diferencias significativas entre los tratamientos ( $p \leq 0.05$ ), en la comparación de medias se encontró que los tratamientos con NPs orgánicas e inorgánicas resultaron con los mayores diámetros de tallo superando al testigo. Los resultados son consistentes con los resultados del primer experimento, donde se demostró que los tratamientos que implicaban la aplicación de nanopartículas orgánicas en dosis de 500 ppm obtuvieron mayor diámetro de tallo comparando con el testigo (Cuadro 33).

En una investigación realizado por Tarafdar *et al.* (2014) se descubrió que las nanopartículas de óxido de zinc (NPs-ZnO) promovieron el aumento en el grosor del tallo de *Pennisetum americanum*, particularmente se notó un incremento significativo en la longitud del tallo en contraste con las plantas del testigo. Por otra parte, Raskar y Laware (2014), se informó que las nanopartículas de óxido de zinc (NPs-ZnO) causaron un impacto negativo en la longitud y la cantidad de biomasa de los brotes y

las raíces de las plántulas de cebolla después de haber sido expuestas a concentraciones de 10, 20, 30 y 40 mg·L<sup>-1</sup>.

**Cuadro 33.** Comparación de medias para el diámetro de tallo de tomate.

Tratamiento	Media (mm)	Error estándar	Intervalo de confianza (95%)	
			L. I.	L. S.
ZnSO <sub>4</sub> 100	9.700 c	0.506	8.644	10.756
ZnSO <sub>4</sub> 300	11.533 ab	0.506	10.477	12.589
ZnSO <sub>4</sub> 500	10.262 bc	0.506	9.206	11.318
NPs-OSM 100	11.390 ab	0.506	10.334	12.447
NPs-OSM 300	11.748 ab	0.506	10.691	12.804
NPs-OSM 500	12.138 a	0.506	11.082	13.194
NPs-Zn 100	11.743 ab	0.506	10.687	12.799
NPs-Zn 300	11.743 ab	0.506	10.687	12.799
NPs-Zn 500	10.876 abc	0.506	9.820	11.932
Testigo	9.752 c	0.506	8.696	10.809

#### 4.2.3. Peso de fruto

El análisis de varianza para el peso individual del fruto resultó con diferencias significativas ( $p = 0.024$ ), en la comparación de medias se encontró que los tratamientos 4 y 5 (NPs orgánicas en dosis de 500 y 300, respectivamente) resultaron con los mayores pesos de fruto superando al testigo. Los análisis de varianza para el largo y diámetro de fruto ( $p = 0.245$ ,  $p = 0.079$ ) resultaron con diferencias no significativas. Los resultados son consistentes con lo observado en el primer experimento, donde se observó que los tratamientos que involucraron la aplicación de nanopartículas orgánicas en dosis de 500 obtuvieron mayor peso de fruto comparando con otras dosis (Cuadro 34).

De acuerdo con los resultados obtenidos por Ahmed *et al.* (2017) quienes al aplicar NPs de Zn a concentraciones de 50 ppm en plantas de tomate registraron un mayor número de racimos, mientras que Zhao *et al.* (2014) observó que la aplicación individual de NPs de Zn, Cu y Fe tuvieron efectos similares; cabe destacar que la combinación NPs promovió mayor peso de frutos y como consecuencia un mayor rendimiento concordando con Parra *et al.* (2016).

**Cuadro 34.** Comparación de medias de peso fruto de tomate para nanopartículas de diferentes dosis.

Tratamiento	Media (kg)	Error estándar	Intervalo de confianza (95%)	
			L. I.	L. S.
ZnSO <sub>4</sub> 100	111.498 ab	3.599	104.428	118.568
ZnSO <sub>4</sub> 300	116.636 ab	3.692	109.384	123.888
ZnSO <sub>4</sub> 500	108.996 b	3.846	101.441	116.550
NPs-OSM 100	109.843 ab	3.275	103.410	116.276
NPs-OSM 300	124.190 a	4.349	115.648	132.732
NPs-OSM 500	119.751 a	2.768	114.315	125.187
NPs-Zn 100	117.226 ab	3.716	109.926	124.525
NPs-Zn 300	120.570 ab	3.577	113.544	127.596
NPs-Zn 500	116.725 ab	3.374	110.097	123.353
Testigo	107.905 b	3.927	100.192	115.618

#### 4.2.4. Diámetro polar de fruto

El análisis de varianza para el diámetro polar del fruto de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) no mostró diferencias significativas ( $p=0.213$ ). Las medias de los tratamientos en el Cuadro 35 se presentan.

**Cuadro 35:** Medias del diámetro polar de fruto para nanopartículas en diferentes dosis.

Tratamiento	Media (mm)	Error estándar	Intervalo de confianza (95%)	
			L. I.	L. S.
ZnSO <sub>4</sub> 100	70.699	0.838	69.052	72.346
ZnSO <sub>4</sub> 300	70.223	0.860	68.533	71.912
ZnSO <sub>4</sub> 500	68.586	0.896	66.827	70.346
NPs-OSM 100	68.366	0.763	66.867	69.864
NPs-OSM 300	69.818	1.013	67.828	71.808
NPs-OSM 500	70.726	0.645	69.460	71.992
NPs-Zn 100	69.144	0.866	67.443	70.844
NPs-Zn 300	70.482	0.833	68.846	72.119
NPs-Zn 500	69.546	0.786	68.002	71.090
Testigo	68.183	0.915	66.386	69.979

#### 4.2.5. Diámetro ecuatorial de fruto

El análisis de varianza para diámetro del fruto tomate (*Solanum lycopersicum* L.) no tuvo diferencias significativas ( $p=0.311$ ). Las medias de los tratamientos en el Cuadro 36 se presentan.

**Cuadro 36:** Medias de diámetro fruto para nanopartículas de diferentes dosis.

Tratamiento	Media (mm)	Error estándar	Intervalo de confianza (95%)	
			L. I.	L. S.
ZnSO <sub>4</sub> 100	54.022	0.762	52.525	55.520
ZnSO <sub>4</sub> 300	53.754	0.782	52.218	55.290
ZnSO <sub>4</sub> 500	52.295	0.814	50.695	53.895
NPs-OSM 100	52.772	0.694	51.410	54.134
NPs-OSM 300	55.390	0.921	53.581	57.198
NPs-OSM 500	54.124	0.586	52.973	55.275
NPs-Zn 100	53.483	0.787	51.937	55.029
NPs-Zn 300	54.743	0.757	53.255	56.231
NPs-Zn 500	54.097	0.715	52.694	55.501
Testigo	51.934	0.832	50.300	53.567

#### 4.2.6. Rendimiento

El análisis de varianza para rendimiento por unidad experimental marcó una diferencia significativa entre los tratamientos (Cuadro 36). La prueba de comparación de medias mostró que los tratamientos con nanopartículas tuvieron mayor rendimiento que el testigo, demostrando que las nanopartículas pueden ser una opción para mejorar los rendimientos dentro del método de cultivo de tomate en un invernadero (Cuadro 37).

Los datos de rendimiento también fueron analizados utilizando el modelo factorial, en donde se encontró diferencia significativa entre tipos de fertilizantes. La comparación de medias mostró que el fertilizante de NPs orgánicas tuvo el mayor rendimiento (Cuadro 38).

De acuerdo con los resultados obtenidos por Palchoudhury *et al.* (2018) en un estudio, donde aplicaron la dosis de 1100 ppm de NPs de Fe con lo que el rendimiento se incrementó al doble en leguminosas; también Mahmoud *et al.* (2019) reportaron que al utilizar concentración de 60 ppm de Zn y 50 ppm de Fe incrementaron en 13.1% el rendimiento de rábano (*Rahanus sativus* L.) fueron significativas.

**Cuadro 37.** Comparación de medias de rendimiento de tomate para nanopartículas en diferentes dosis.

Tratamiento	Media (kg)	Error estándar	Intervalo de confianza (95%)	
			L. I.	L. S.
ZnSO <sub>4</sub> 100	2.156 bc	0.201	1.735	2.576
ZnSO <sub>4</sub> 300	2.133 c	0.201	1.713	2.554
ZnSO <sub>4</sub> 500	2.667 bc	0.201	2.246	3.087
NPs-OSM 100	3.487 a	0.201	3.066	3.907
NPs-OSM 300	2.815 ab	0.201	2.395	3.235
NPs-OSM 500	2.523 bc	0.201	2.103	2.944
NPs-Zn 100	2.310 bc	0.201	1.890	2.730
NPs-Zn 300	2.283 bc	0.201	1.863	2.704
NPs-Zn 500	2.370 bc	0.201	1.950	2.790
Testigo	2.047 c	0.201	1.626	2.467

**Cuadro 38.** Comparación de medias de rendimiento de tomate para nanopartículas de diferentes fertilizantes.

Fertilizante	Media (%)	Error estándar	Intervalo de confianza (95%)	
			L. I.	L. S.
ZnSO <sub>4</sub>	2.319 b	0.119	2.069	2.568
NPs-OSM	2.942 a	0.119	2.692	3.191
NPs-ZnO	2.321 b	0.119	2.071	2.571

## 5. CONCLUSIONES

La aplicación de NPs-Zn (orgánicas e inorgánicas) tuvieron un efecto positivo sobre la altura de la planta y diámetro del tallo. Estas estimularon el crecimiento de las plantas en comparación con el tratamiento control.

De acuerdo con los resultados del análisis de este experimento se encontró que aplicaciones de  $\text{ZnSO}_4$  300, NPs-OSM 500 y NPs-Zn 500 tuvieron efecto importante en el crecimiento y rendimiento del cultivo de pepino.

De acuerdo con los resultados del análisis de este experimento, se encontró que las NPs-ZnO (500) tuvieron efecto importante en la concentración de nitrógeno y calcio presentes en las hojas del pepino.

La aplicación de nanopartículas de zinc, tanto orgánicas como inorgánicas, generó resultados beneficiosos en el rendimiento de la cosecha del cultivo de tomate.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Adesemoye, A.; Kloepper, J. (2015). Plant-microbe's interactions in enhanced fertilizer use efficiency. *Applied Microb. Biotechnology*. 85: 1-12.
- Agriculturers. (2018). Panorama mundial del comercio de hortalizas en 2018. Agriculturers Red de Especialistas en Agricultura, 16 de febrero. Disponible en: <http://agriculturers.com/panorama-mundial-del-comercio-de-hortalizas-en-2018/>.
- Ahmed, S., Chaudhry, S. A., Ikram, S. (2017). A review on biogenic synthesis of ZnO nanoparticles using plant extracts and microbes: A prospect towards green Chemistry. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 166: 272-284.
- Alarcón, E., Bueno-Alejo, C., Noel, C., Stampelcoskie, K., Pacioni, N., Poblete, H. y Scaiano, J. (2012). Human serum albumin as protecting agent of silver nanoparticles: role of the protein conformation and amine groups in the nanoparticle stabilization. *J Nanopart Res* 15: 1374.
- Asgrow, (2018). Moder Cucumber 78 reducción. Asgrow seed company, 78 reducción of the company, Michigan; E. U. A. Adesemoye, A.; Kloepper, J. (2015). Plant-microbes' interactions in enhanced fertilizer use efficiency. *Applied Microb. Biotechnology*. 85: 1-12.
- Burman, U., Saini, M. y Kumar, P. (2013). Effect of zinc oxide nanoparticles on growth and antioxidant system of chickpea seedlings. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 95: 605- 612.

- Corral-Díaz, B., J. R. Peralta-Videa, E. Alvarez-Parrilla, J. Rodrigo-García, M. I. Morales, P. Osuna-Avila, G. Niu, J. A. Hernandez-Viezcas, and J. L. Gardea-Torresdey. (2014). "Cerium Oxide Nanoparticles Alter the Antioxidant Capacity but Do Not Impact Tuber Ionome in *Raphanus sativus* (L)." *Plant Physiology and Biochemistry* 84: 277–85.
- Davarpanah, S., Tehranifar, A., Davarynejad, G., Abadía, J., and Khorasani, R. (2016). Effects of foliar applications of zinc and boron nano-fertilizers on pomegranate (*Punica granatum* cv. Ardestani) fruit yield and quality. *Scientia horticulturae*, 210, 57-64.
- De la Rosa J.E., R. Peralta-Videa, H. Catillo y S. Majumdar. (2013). La exposición de las nanopartículas de óxido de zinc y los mecanismos de defensa en plantas de tomate 273-287.
- Dubey, A., & Mailapalli, D. R. (2016). Nanofertilizers, nanopesticides, nanosensors of pest and nanotoxicity in agriculture. En Lichtfouse, E. (ed.), *Sustainable Agriculture Reviews* (pp. 307-330). Springer International Publishing.
- Fageria, N. K. (2016). *The use of nutrients in crop plants*. Boca ratón: CRC press. 448 p.10.
- FAO. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2020). *Semillas en emergencia. Manual técnico*. Roma, Italia. 81 p.
- FAO. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2018). *Semillas en emergencia. Manual técnico*. Roma, Italia. 81 p.
- FAOSTAT. Pepinos, pepinillos [Conjunto de datos]. Recuperado 30 enero, (2020). de <http://www.fao.org/faostat/es/#search/Pepinos%2C%20pepinillos>.

- Fraceto, L.F.; Grillo, R.; De Medeiros, G.A.; Scognamiglio, V.; Rea, G.; Bartolucci, C. (2016). Nanotechnology in agriculture: Which innovation potential does it have? *Frontiers in Environmental Science*. 4:1-5.
- García, I. L. (2019). Respuestas fisiológicas y bioquímicas inducidas por nanopartículas de ZnO en semillas y plantas de chile habanero (*capsicum chinense* jacq), Universidad Autónoma De Nuevo León Facultad De Agronomía.
- Garza-Alonso, C. A., Emilio O. S., Susana G. M., Marcelino C. De la F., Antonio J. M., José Antonio G. F., Gonzalo T., Marín V. V. C., and Adalberto B. M. (2022). Strawberry Biostimulation: From Mechanisms of Action to Plant Growth and Fruit Quality, *Plants* 2022, 11, 3463.
- García-Gómez, C.; Obrador, A.; González, D.; Babín, M. y Fernández, M. D. (2017). Efecto comparativo de NP de ZnO, ZnO a granel y ZnSO<sub>4</sub> en las defensas antioxidantes de dos especies de plantas que crecen en dos suelos agrícolas en condiciones de invernadero. *Sci. Total, Environ.* 589(7):11-24.
- González, V. (2013). Reconocimiento e inspección de alimentos de origen vegetal parámetros indicadores de calidad. *Frutas y Hortalizas*. Instituto Canario de Investigaciones Agrarias. Disponible.
- Gálvez, H. F. (2015). El cultivo de pepino en invernadero. In: *Manual de Producción Hortícola en Invernadero*. 2a ed. R J Castellanos (ed). INTAGRI. Celaya, Gto. México. 282-293.
- Goja, A., Osman, M. (2013). Preliminary study on efficacy of leaves, seeds, and bark extracts of *Moringa oleifera* in reducing bacterial load in water. *International Journal of Advanced Research*, 1: 124-130.

- Gómez-López, M.D.; Fernández-Trujillo, J.P.; Baille, A. (2016). Cucumber fruit quality at harvest affected by soilless system, crop age and preharvest climatic conditions during two consecutive seasons, *Scientia Horticulturae*, 110: 68-78.
- Gómez, M., Baille M., M. González y J. Mercader. (2003). Comparative analysis of water and nutrient uptake of glasshouse cucumber grown in NFT and perlite. *Acta Hortic.* 614, 175-180.
- Grijalva, R.L., Macías R., S. A., Grijalva y Robles F. (2011). Evaluación del efecto de la fecha de siembra en la productividad y calidad de híbridos de pepino europeo bajo condiciones de invernadero en el noroeste de Sonora. *Biocencia* 13(1), 29-36.
- Handford, C., Dean, M., Henchion, M., Spence, M., Elliott, C., & Campbell, K. (2014). Implications of nanotechnology for the agri-food industry: Opportunities, benefits, and risks. *Trends in Food Science & Technology*, 40(2), 226-241.
- Hernandez-Viezcas, J. A., Castillo-Michel, H., Andrews, J. C., Cotte, M., Rico, C., Peralta-Videa, J. R., & Gardea-Torresdey, J. L. (2013). In situ synchrotron X-ray fluorescence mapping and speciation of CeO<sub>2</sub> and ZnO nanoparticles in soil cultivated soybean (*Glycine max*). *ACS nano*, 7(2), 1415-1423.
- Héctor M. A. C., Emilio O. S., Carlos A. G. A., Edgar V. G. C., Rigoberto E. V. A., María del C. O. Z., (2022). Evaluación de calcio, silicio y nanopartículas de hidroxiapatita sobre la calidad de higo (*ficus carica* L.) producido en dos densidades, en invernadero. Universidad Autónoma De Nuevo León Facultad De Agronomía p 50.
- Hossain, A.; Skalicky, M.; Brestic, M.; Mahari, S.; Kerry, R.G.; Maitra, S.; Sarkar, S.; Saha, S.; Bhadra, P.; Popov, M.; (2021). Application of Nanomaterials to Ensure Quality and Nutritional Safety of Food. *J. Nanomater.*, 2021, 9336082.

- Hochmuth, R.C.; Davis, L.L.L.; Laughlin, W.L.; Simonne, E.H.; Sargent, S. A.; and Berry, A. (2016). Evaluation of twelve greenhouse mini cucumber (Beit Alpha) cultivars and two growing systems during the 2014- 2015 winter sea- son in Florida 2016: 2004.659.61.
- Huang, J., Lin, L., Sun, D., Chen, H., Yang, D., Li, Q. (2015). Bio-inspired synthesis of metal nanomaterials and applications. *Chemical Society Reviews*, 44: 6330-6374.
- Isman, B. M. and Grieneisen, L. M. (2015). Botanical insecticide research: many publications, limited useful data. *USA. Trends in plant Science*. 19(3):140-145.
- INEGI. (2020). Mapa Digital de México V6.3.0.
- INIFAP. (2017). Centro de Investigación Regional del Pacifico Centro. Campo experimental Santiago Ixcuintla. Folleto para productores Número 2. p. 4.
- Jasso-Chaverria, C.; Hochmuth, G. J.; Hochmuth, R.C. and Sargent, S. A. (2015). Fruit yield, size, and color responses of two greenhouse cucumber types to nitrogen fertilization in perlite soilless culture, *Hort Technology*, 15(3): 565-571.
- Jurkow, R.; Pokluda, R.; Sękara, A. y Kalisz, A. (2020). Impact of foliar application of some metal nanoparticles on antioxidant system in oakleaf lettuce seedlings. *BMC Plant Biology*. 20(290):1-12.
- Jellani, G.; Atif, M.; Ullah, H.; Ali, M.; Musa, M. (2015). Influence of seedling age on cucumber (*Cucumis sativus* L.) production. *SAARC J. Agri. (Bangladesh)*. 13(2): 214-221.

- Juárez-Maldonado, A.; Ortega-Ortíz, H.; Morales-Díaz, A.B.; González-Morales, S.; Morelos-Moreno, Á.; Cabrera-De la Fuente, M.; Sandoval-Rangel, A.; Cadenas Pliego, G.; Benavides-Mendoza, A. (2018). Nanoparticles and nanomaterials as plant biostimulants. 2019, 20, 162.
- Juárez-Maldonado, A.; Tortella, G.; Rubilar, O.; Fincheira, P.; Benavides-Mendoza, A. (2021). Biostimulation and toxicity: The magnitude of the impact of nanomaterials in microorganisms and plants. *J. Adv. Res.*, 31, 113–126.
- Karami, S., R. Heidari, F. Rahmani (2015). Effect of silver nanoparticles on free amino acids content and antioxidant defense system of tomato plants. *Indian Journal of Physiology Plants* 3(20): 257-263.
- Khanm, H.; Vaishnavi, B.A.; Namratha. M.R.; Shankar. A.G. 2017. Nano zinc oxide boosting growth and yield in tomato: The rise of nano fertilizer era. *IJASR*, 7, 197-206.
- Kurwadkar, S., Pugh, K., Gupta, A., & Ingole, S. (2015). Nanoparticles in the environment: occurrence, distribution, and risks. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 19(3), 04014039.
- Kumar, K. M., Mandal, B. K., Tammina, S. K. (2013). Green synthesis of nano platinum using naturally occurring polyphenols. *RSC Advances*, 3: 4033-4039.
- Lenscak, M. P. (2019). *Invernaderos, Tecnología apropiada en las regiones productivas del territorio nacional argentino*. INTA Ediciones IPAF, Región Pampeana. N°26.899.
- Lira, S., Esparza, R., Hernández, S., Vera, R., Moreno, L., Betancourt, G., & García, C. (2015). Antifungal and antibacterial effect of metallic nanoparticles against

plant pathogens. 5to Seminario Internacional de Nanociencias y Nanotecnologías. La Habana, Cuba. P 35.

López-Vargas, E.; Ortega-Ortiz, H.; Cadenas-Pliego, G.; Alba-Romenus, K.; Cabrera-Fuente, M.; Benavides-Mendoza, A. y Juárez-Maldonado, A. (2018). La aplicación foliar de nanopartículas de cobre aumenta la calidad de la fruta y el contenido de compuestos bioactivos en pepino. *Ciencias Aplicadas*. 8(7):10-20.

López-Elías, J., Ortega, S. G., Huez López, M. A., León, J. J., Puente, E. O. R., & Amador, B. M. (2015). Producción de pepino (*Cucumis sativus* L.) en función de la densidad de plantación en condiciones de invernadero. *European Scientific Journal*, ESJ, 11(24).

Matinise, N., Fuku, X. G., Kaviyarasu, K., Mayedwa, N., Maaza, M. (2017). ZnO nanoparticles via *Moringa oleifera* green synthesis: physical properties and mechanism of formation. *Applied Surface Science*, 406: 339-347.

Monsalve, J., E., René, Acevedo, Manuel, Sánchez, Manuel, & Coopman, Rafael. (2009). Efecto de la concentración de nitrógeno sobre atributos morfológicos, potencial de crecimiento radical y estatus nutricional en plantas de *Eucalyptus globulus* producidas a raíz cubierta. *Bosque (Valdivia)*, 30(2): 88-94.

Mahmoud, A. W, Abdelaziz, S, M, El-Mogy, M. M. and Abdeldaym, E. A. (2019). Effect of Foliar de ZnO and FeO Nanoparticles application on Growth and Nutritional quality of Red Radish and Assessment of their Accumulation on Human Health. *Agriculture (Polnohospodarstvo)*, 65 (1): 16-29.

Nava, O. J., Luque, P. A., Gómez-Gutiérrez, C. M., Vilchis-Nestor, A. R., Castro-Beltrán, A., Mota-González, M. L., Olivas, A. (2017). Influence of *Camellia sinensis* extract on Zinc Oxide nanoparticle green synthesis. *Journal of Molecular Structure*, 1134: 121-125.

- Nelson G; Rosegrant M; Koo J; Robertson R; Sulser T; Zhu T; Ringle C; Msangi S; Palazzo A; Batka M; Magalhaes M; Valmonte-S. R; Ewing M; Lee D (2018). Food Policy Report, Climate change: Impact on agriculture and costs of adaptation. International Food Policy Research Institute. Washington, D.C. p. 19.
- Nuruzzaman, M.; Rahman, M.M.; Liu, Y.; Naidu, R. (2016). Nanoencapsulation, Nano-Guard for Pesticides: A New Window for Safe Application. Journal of agricultural and food chemistry. 64: 1447-1483.
- Ortiz, D; y Moran, J. (2010). Estudio comparativo de dos distancias de siembra en pepino (*Cucumis sativus* L.) alzado en huertos organopónicos. P 8.
- Palchoudhury, S., Jungiohann, K., Weerasana, L., Arabshahi, A., Gharge, U., Albattah, A., Miller, J., Patel, K. and Holler, R.A. (2018). Enhanced legume root growth with pre-soaking in  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticule fertilizer. RSC Adv. 8: 24075 – 24083.
- Panwar, J., Jain, N., Bhargaya, A., Akhtar, M.S. y Yun, Y.S. (2012). Positive effect of zinc oxide nanoparticles on tomato plants: A step towards developing nanofertilizers. International Conference on Environmental Research and Technology (ICERT). Malaysia.
- Parra, S., G. Baca, J. Tirado, M. Villareal, P. Sánchez y S. Hernández. (2016). Calidad del fruto, composición y distribución de elementos minerales en pepino en respuesta a silicio y al potencial osmótico de la solución nutritiva. Terra Lat. 27 (2), 123-131.
- Puentes-Páramo, Y. J., Minibar-Flores, J.C., Aranzazu-Hernández F. (2016). Concentración de nutrientes en hojas, una herramienta para el diagnóstico nutricional en cacao. Agronomía Mesoamericana. 27(2): 329-336.

- Pulok, K. M., N.; Neelesh, M.; Niladri, K.; Birendra, S (2014). "Phytochemical and therapeutic potential of cucumber". *Fitoterapia*. 84: 227-236.
- Rai, M., Yadav, A. (2013). Plants as potential synthesiser of precious metal nanoparticles: progress and prospects. *IET nanobiotechnology*, 7: 117-124.
- Raskar, S. V., & Laware, S. L. (2014). Effect of zinc oxide nanoparticles on cytology and seed germination in onion. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 3(2), 467- 473. Retrieved from <http://www.ijcmas.com/vol-3-2/S.V.Raskar and S.L.Laware.pdf>.
- Razzaq, A., R. Ammara, H.M. Jhanzab, T. Mhamood, A. Hafeez, and S. Hussain. (2016). A novel nanomaterial to enhance growth and yield of wheat. *Journal of Nanoscience and Technology* 2(1): 55-58.
- Rajitha, B.; Rajarajeswari, V.; Sudhakar, P.; Naidu, N. V.; Prasad, T. y Reddy, B. (2020). Efecto de nutrientes de plantas a nanoescala en caracteres de plántulas de Blackgram (*Vigna mungo* (L.) Hepper). *Rev. Farmacognosia y Fitoquímica*. 9(2):670-672.
- Redetic, M. (2013). Functionalization of textile materials with silver nanoparticles. *J Mater Sci*, 48: 95-107.
- Reho, A. (2015). El pepino sinaloense continúa escalando su exportación. En: Meister Media Worldwide, <http://www.hortalizas.com/horticultura-protegida/el-pepino-sinaloense-continua-escalando-su-exportacion>.
- Robles, F. C., Cantú, A. M. (2017). Nanoplaguicidas, ¿un verdadero avance para la agricultura? *Revista Bio Ciencias*, 4(3), 164-178.

- Rogers, J., Parkinson, C., Choi, Y., Spechcock, J. y Hussain, S. (2008). A preliminary assessment of silver nanoparticle inhibition of monkeypox virus plaque formation. *Nanoscale Res Lett*, 3: 129-133.
- Rubén G. R., Pablo P., Manuel F., Betancourt-G., Yescas-C. Jorge A (2021). Nanopartículas de óxido de zinc y su efecto en el rendimiento y calidad de melón. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. volumen 12 número 5.
- Salunkhe R. B., Salunke B. K., (2012). Larvicidal activity of silver nanoparticles synthesized using plumeria rubra plant latex against aedes aegypti and anopheles stephens. *Parasitol Report*. 1815-22.
- Sandí-Mendoza, C. G. (2016). Crecimiento, producción y absorción nutricional del cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) con dos soluciones nutritivas en ambiente protegido en la zona de san Carlos, costa rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica Sede Regional San Carlos.
- Saeid, S. (2016). The effect of silver nanoparticle on lentil seed germination under drought stress. *International Journal of Farming and Allied Sciences* 5(3):208-212.
- Sela, G (2017). "Zinc in Plants", ¡SMART! Fertilizer Management. Disponible en: Consultado el 8 de mayo de 2017.
- SMN, (2020). Normales Climatológicas del estado de NuevoLeón. Recuperado de: [https://smn.conagua.gob.mx/es/climatología/información Climatológica/normales-climatológicas-por-estado](https://smn.conagua.gob.mx/es/climatología/información%20Climatológica/normales-climatológicas-por-estado).
- Shalaby, T. A., Bayoumi, Y., Abdalla, N., Taha, H., Alshaal, T., Shehata, S., & ElRamady, H. (2016). Nanoparticles, soils, plants, and sustainable agriculture. In *Nanoscience in Food and Agriculture* 1 (pp. 283-312).

- Shaw, N.L.; Cantliffe, D.J.; Rodríguez, J.C.; Taylor, S., and Spencer, D.M. (2017). Beit Alpha cucumber: an exciting new greenhouse crop. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, 113: 247-253.
- Sheoran, P., Grewal, S., Kumari, S. and Goel, S., (2021). Enhancement of growth and yield, leaching reduction in *Triticum aestivum* using biogenic synthesized zinc oxide nanofertilizer. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 32, pp. 101938.
- SIAP. (2017). Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Recuperado el 20 de septiembre de 2018, de [http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola\\_siap](http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap).
- SIAP. (2019). Anuario estadístico de la producción agrícola a nivel nacional 2019. Retrieved from <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>.
- SIAP. (2020). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera En línea <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccionagricola-33119>.
- SIAP. (2021). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. SAGARPA, México. Disponible en <http://www.campomexicano.gob.mx/boletinsiap/002-e.html>.
- Singh, R. P.; Handa, R.; Manchanda, G. (2021). Nanoparticles in sustainable agriculture: An emerging opportunity. *Journal of Controlled Release*. 329, 1234-1248.
- Sinclair, S. A. y U. Krämer (2012). "The zinc homeostasis network of land plants", *Biochimica et Biophysica Acta*, 1823:1553-1567.
- Sturikova, H. K.; Huska, D.; Adam, V. (2018). Zinc, zinc nanoparticles and plants. *J. Hazardous Materials*. 349:101-110.

- Srilatha, B. (2011). Nanotechnology in agriculture. *J. Nanomedic Nanotechnology* 2(7):1-5.
- Suslow, T.; Cantwell, M. (2016). Cucumber: Recommendations for Maintaining Postharvest Quality. Department of plant Sciences, University of California Davis. Disponible en [http://postharvest.ucdavis.edu/Hortalizas/Pepino\\_796](http://postharvest.ucdavis.edu/Hortalizas/Pepino_796).
- Tarafdar, J.C., Raliya, R., Mahawar, H. y Rathore, I. (2014). Development of zinc nanofertilizer to enhance crop production in pearl millet (*Pennisetum americanum*). *Agricultural Research*, 3:257-262.
- Tomlinson, I. (2013). Doubling food production to feed the 9 billion: a critical perspective on a key discourse of food security in the UK. *Journal of Rural Studies*, 29, 81-90.
- Terry, E. D. d. A., M.; Padrón, J.; Tejeda, T.; Zea, M. Camacho-Ferré, F. (2015). Effects of different bioactive products used as growth stimulators in lettuce crops (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Food, Agriculture. Environ.* 10: 386-389.
- Tonder, A., Joubert, A., y Cromarty, D. (2015). Limitations of the 3-(4, 5-dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyl-2H-tetrazolium bromide (MTT) assay when compared to three commonly used cell enumeration assays. *BMC Research Notes*, 8:47.
- Usman, M.; Farooq, M.; Wakeel, A.; Nawaz, A.; Cheema, S.A.; Rehman, H. Ur; Ashraf, I.; Sanaullah, M. (2020). Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges and future opportunities. *Sci. Total, Environ*, 721, 137778.
- Vasco Morcillo, R. (2015). El cultivo del pepino bajo invernadero. En *Técnicas de producción en cultivos protegidos [Recurso electrónico]* / Francisco Camacho Ferre (coordinador) (p. 691-722; Vol. 2).

- Wang, Q. (2014). Cronic impact of cerium oxide nanoparticles on *Solanum lycopersicum* L. and *Brassica rapa* L. Environmental engineering. Southern Illinois University Carbondale 242.
- Zhang, Y. y H. Shi. (2017). Influences of phosphate deficiency in the medium on growth, activities of antioxidant enzymes and utilization of nitrogen resource in *Cucumis sativus* hairy roots. Chin. J. Biotechnol. 24(9), 1604-1612.
- Zanella, R. (2012). Metodologías para la síntesis de nanopartículas: controlando forma y tamaño. Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotecnología, 5: 70-81.
- Zhao, L., Sun, Y., Hernandez, V.J., Servin, A.D. Hong, J., Niu, G., Peralta, V.J., Duarte, G.M. y Gardea, T.J. (2014). Influence of CeO<sub>2</sub> and ZnO nanoparticles on cucumber physiological markers and bioaccumulation of Ce and Zn: A life cycle study. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 61: 11945-11951.

## 7. ANEXO

**Anexo 1.** Fechas de las actividades realizadas durante el experimento: Evaluación de nanopartículas de zinc orgánicas e inorgánicas en pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo condiciones de invernadero.

<b>Actividades</b>	<b>Dosis/Cantidad/Método</b>	<b>Fecha</b>
Preparación Charolas	4 de 32 cavidades	4 de enero 2022
Preparación sustrato	Peatmos y Vermiculita	4 de enero 2022
Siembra (Semilla)	Pepino (Poinsett 76)	4 de enero 2022
Control de plagas y enfermedades	Abamectina (1/2 ml L <sup>-1</sup> )	19 de enero 2022
Aplicación de fertilizantes	18-18-18 (2 g / en 4 lt)	4 de febrero 2022
Control de plagas y enfermedades	Abmectina y Rotaprid (1ml L <sup>-1</sup> )	14 de febrero 2022
Llenar las tinas con Perlita	32 tinas	4 de febrero 2022
Preparación suelo (Cama)	35 m (Largo)	8 de febrero 2022
Instalación Sistema de Riego	---	18 de febrero 2022
Instalación de las Tinas	32 tinas	19 de febrero 2022
Trasplante (Pepino)	64 plántulas	26 de febrero 2022
Preparación de solución completo	N-P-K/Ca (NO <sub>3</sub> ) <sup>2</sup> /Mg SO <sub>4</sub>	3 de marzo 2022
Aplicación de solución completo	N-P-K/Ca (NO <sub>3</sub> ) <sup>2</sup> /Mg SO <sub>4</sub>	4 de marzo 2022
Solución completa I	Timer de riego (8 minutos al día)	4 de marzo 2022
Solución completa II	Fertirriego	3 de marzo 2022
Entrega nanopartículas	2 paquete	11 de marzo 2022
Riego completo II	Con mano	13 de marzo 2022
Aplicaciones Nanopartículas	Foliar (1)	15 de marzo 2022
solución completa III	Fertirriego	17 de marzo 2022
Poda en las plantas	---	23 de marzo 2022
solución Completo IV	Fertirriego	30 de marzo 2022
Aplicaciones Nanopartículas	Foliar (2)	8 de abril 2022
Solución Completo V	Fertirriego	6 de abril 2022
Solución Completo VI	Fertirriego	13 de abril 2022
Solución Completo VII	Fertirriego	20 de abril 2022
Solución Completo VIII	Fertirriego	27 de abril 2022
Aplicación jabón potásico	Insecticida/jabón potásico	29 de abril 2022
Solución Completo IX	Fertirriego	4 de mayo 2022
Cosecha I	49 frutas	20 de abril 2022
Cosecha II	134 frutas	28 de abril 2022
Cosecha III	55 frutas	3 de mayo 2022
Cosecha IV	165 frutas	10 de mayo 2022

---

Corta de pepino	Enfriamiento	12 de mayo 2022
Corta de las hojas	Secar en bolsa de papel (6 hojas)	17 de mayo 2022
Cosecha V	--	23 de mayo 2022
Secar las hojas	DX602C	15 de junio 2022
Molido hojas	32 bolsas	4 de julio 2022
Análisis tejido foliar en lab. Marine, NL	Extracto de 30 ml	27 de febrero 2023

---

**Anexo 2.** Fechas en las que se prepararon las soluciones nutritivas (fertirriego) realizadas durante el experimento 1: Evaluación de nanopartículas de zinc orgánicas e inorgánicas en pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo condiciones de invernadero.

Fecha	Reactivos	Dosis
4 de marzo 2022	Nitrógeno (N)	97 g
	Fosforo (P) P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	28.6 g
	Potasio (K) K <sub>2</sub> O	50.2
	Nitrato de calcio (Ca (NO <sub>3</sub> ) <sup>2</sup> )	320 g
	Sulfato de Magnesio (MgSO <sub>4</sub> )	121.95 g
	Agua de solución (CE= 3.6/72 ppm)	450 lt
10 de marzo 2022	Nitrógeno (N)	97 g
	Fosforo (P) P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	28.6 g
	Potasio (K) K <sub>2</sub> O	50.2 g
	Nitrato de calcio (Ca (NO <sub>3</sub> ) <sup>2</sup> )	320 g
	Sulfato de Magnesio (MgSO <sub>4</sub> )	121.95 g
	Agua de solución (CE= 3.6/72 ppm)	450 lt
15 de marzo 2022	Nitrógeno (N)	146 g
	Fosforo (P) P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	43 g
	Potasio (K) K <sub>2</sub> O	75 g
	Nitrato de calcio (Ca (NO <sub>3</sub> ) <sup>2</sup> )	480 g
	Sulfato de Magnesio (MgSO <sub>4</sub> )	181.5 g
	Agua de solución (CE= 3.6/72 ppm)	450 lt
	Sulfato de cobre (Cu SO <sub>4</sub> )	1.3 g
	Ácido Bórico (Boro) H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	10.3 g
Fierro (Fe)	8 ml	
24 de marzo 2022	Nitrógeno (N)	194.12 g
	Fosforo (P) P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	57.3 g
	Potasio (K) K <sub>2</sub> O	100.1 g
	Nitrato de calcio (Ca (NO <sub>3</sub> ) <sup>2</sup> )	288 g
	Sulfato de Magnesio (MgSO <sub>4</sub> )	242 g
	Agua de solución (CE= 3.6/72 ppm)	450 lt
	Sulfato de cobre (Cu SO <sub>4</sub> )	1.3 g
	Ácido Bórico (Boro) H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	10.3 g
Fierro (Fe)	8 ml	
30 de marzo 2022	Nitrógeno (N)	194.12 g
	Fosforo (P) P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	57.3 g
	Potasio (K) K <sub>2</sub> O	100.1 g
	Nitrato de calcio (Ca (NO <sub>3</sub> ) <sup>2</sup> )	288 g
	Sulfato de Magnesio (MgSO <sub>4</sub> )	242 g

	Agua de solución (CE= 3.6/72 ppm)	450 lt
	Sulfato de cobre (Cu SO <sub>4</sub> )	1.3 g
	Ácido Bórico (Boro) H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	10.3 g
	Fierro (Fe)	8 ml
6 de abril 2022	Nitrógeno (N)	185.1 g
	Fosforo (P) P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	34.5 g
	Potasio (K) K <sub>2</sub> O	166. g5
	Nitrato de calcio (Ca (NO <sub>3</sub> ) <sup>2</sup> )	212 g
	Sulfato de Magnesio (MgSO <sub>4</sub> )	242 g
	Agua de solución (CE= 3.6/72 ppm)	450 lt
	Sulfato de cobre (Cu SO <sub>4</sub> )	1.3 g
	Ácido Bórico (Boro) H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	10.3 g
	Fierro (Fe)	8 ml
	Ácido sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	31.5 ml
13 de abril 2022	Nitrógeno (N)	185.1 g
	Fosforo (P) P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	34.5 g
	Potasio (K) K <sub>2</sub> O	166. g
	Nitrato de calcio (Ca (NO <sub>3</sub> ) <sup>2</sup> )	212 g
	Sulfato de Magnesio (MgSO <sub>4</sub> )	242 g
	Agua de solución (CE= 3.6/72 ppm)	450 lt
	Sulfato de cobre (Cu SO <sub>4</sub> )	1.3 g
	Ácido Bórico (Boro) H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	10.3 g
	Fierro (Fe)	8 ml
	Ácido sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	31.5 ml
20 de abril 2022	Nitrógeno (N)	185.1 g
	Fosforo (P) P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	34.5 g
	Potasio (K) K <sub>2</sub> O	166. g5
	Nitrato de calcio (Ca (NO <sub>3</sub> ) <sup>2</sup> )	212 g
	Sulfato de Magnesio (MgSO <sub>4</sub> )	242 g
	Agua de solución (CE= 3.6/72 ppm)	450 lt
	Sulfato de cobre (Cu SO <sub>4</sub> )	1.3 g
	Ácido Bórico (Boro) H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	10.3 g
	Fierro (Fe)	8 ml
	Ácido sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	31.5 ml
27 de abril 2022	Nitrógeno (N)	185.1 g
	Fosforo (P) P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	34.5 g
	Potasio (K) K <sub>2</sub> O	166. 5 g
	Nitrato de calcio (Ca (NO <sub>3</sub> ) <sup>2</sup> )	212 g
	Sulfato de Magnesio (MgSO <sub>4</sub> )	242 g
	Agua de solución (CE= 3.6/72 ppm)	450 lt

	Sulfato de cobre (Cu SO <sub>4</sub> )	1.3 g
	Ácido Bórico (Boro) H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	10.3 g
	Fierro (Fe)	8 ml
	Ácido sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	31.5 ml
	<hr/>	
	Nitrógeno (N)	185.1 g
	Fosforo (P) P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	34.5 g
	Potasio (K) K <sub>2</sub> O	166. g5
	Nitrato de calcio (Ca (NO <sub>3</sub> ) <sup>2</sup> )	212 g
	Sulfato de Magnesio (MgSO <sub>4</sub> )	242 g
4 de mayo 2022	Agua de solución (CE= 3.6/72 ppm)	450 lt
	Sulfato de cobre (Cu SO <sub>4</sub> )	1.3 g
	Ácido Bórico (Boro) H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	10.3 g
	Fierro (Fe)	8 ml
	Ácido sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	31.5 ml
	<hr/>	

**Anexo 3.** Fotografías Tomadas Durante el Establecimiento del Experimento: Evaluación de nanopartículas de zinc orgánicas e inorgánicas en pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo condiciones de invernadero.

