

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA  
DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Respuesta a la Aplicación de Nanopartículas de Níquel y  
de Selenio en *Solanum lycopersicum*

Por:

**MIGUEL ÁNGEL AYALA DEMESA**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN**

Saltillo, Coahuila, México

Noviembre 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Respuesta a la Aplicación de Nanopartículas de Níquel y  
de Selenio en *Solanum lycopersicum*

Por:

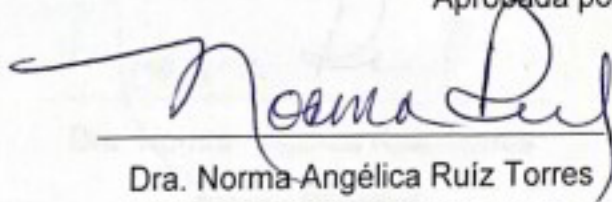
**MIGUEL ÁNGEL AYALA DEMESA**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN**

Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dra. Norma Angélica Ruiz Torres

Asesor Principal



Dra. Ileana Vera Reyes

Asesor Principal Externo



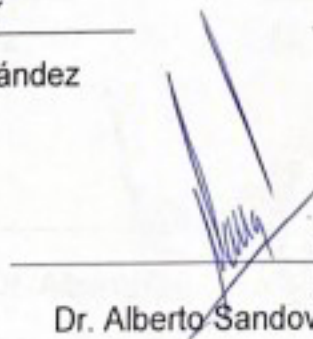
Dra. Pilar Espitia Hernández

Coasesor



Lic. Úrsula Elva Casar Belmares

Coasesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel

Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Noviembre 2025

### **Declaración de no plagio**

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

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

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

**Pasante**



Miguel Ángel Mejía

## DEDICATORIA

A mis Padres

A la persona que me dio la vida y en quien está puesto todo mi amor; la persona que siempre, y a pesar de todo, está conmigo; la persona que me ha brindado un amor inconmensurable, inefable, inigualable e inexorable; mi madre.

A ella, por ser la persona más maravillosa que tengo en la vida, quien me da la fuerza para seguir; a ella, que me da el ejemplo de nunca rendirme; a ella, que me ha brindado el amor más puro de este mundo.

A ella va mi felicidad, mi trabajo, mi dedicación y entrega. Gracias, por tanto, sin ti estas palabras no tendrían sentido. Con el corazón en las manos estaré agradecido por cada momento que he pasado junto a ti.

A mi padre, por el gran esfuerzo de brindarme la mejor de las herencias; el estudio. A él que siempre me motivó por conocer nuevos lugares y que me dio todo lo que estuvo en sus posibilidades para culminar con éxito mi carrera.

También, darle inmensas gracias a mi tío, el señor Elmer, que siempre me ha brindado apoyo, pero, sobre todo, un cariño verdadero y muy especial. A él, que siempre ha querido lo mejor para mí. Gracias, tío, por confiar en mí y por todos los consejos que me ha brinda a lo largo de los años. Gracias por toda la enseñanza y ayuda. Siempre tendré en mente que usted fue quien tuvo la paciencia y las ganas de enseñarme a trabajar.

A mi bisabuelo, el señor Luis Ayala, que desde niño me empezó a llevar al campo y fue él quien despertó en mí el amor y la curiosidad por la tierra.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la vida, que me ha llenado de experiencias asombrosas.

A la razón, donde siempre encuentro una respuesta.

A la ciencia, que es la mayor de todas las verdades.

Al conocimiento, que día a día despierta preguntas en mí.

A los maestros, que con su sed de enseñar forman profesionistas.

A la Doctora Norma Angélica Ruiz Torres, por la paciencia que me tuvo, el apoyo brindado y por ser una excelente maestra.

A Luis Ángel Lemus, quien fue el primero de mis más grandes amigos; a Sacramento Gómez, una persona maravillosa y con un corazón digno de admirar; a Jesús M. Cruz, verdaderamente leal; a Adán I. Arredondo, que fue como un hermano y con el que pasé momentos indescriptibles; a José F. Coronado, que me brindó muchísima ayuda y apoyo, y que se convirtió en una persona inmensamente especial para mí.

A Estefanía Martínez Conde y a Shanevy Nava Ortiz que las quiero con todo el corazón y que representa en mi vida un pilar muy grande y de sostén para que todo esto haya podido concluir.

A la señora, Eva Ortiz que quiero muchísimo y que de alguna manera siempre ha visto por mí. Muchas gracias por toda la ayuda que me ha brindado.

Y en general, a todas las personas que me apoyaron, que me dieron palabras de aliento, que se preocuparon por mi bienestar, que me dieron compañía, a todas esas personas muchas gracias.

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS .....	7
RESUMEN .....	8
INTRODUCCIÓN .....	9
OBJETIVO GENERAL .....	11
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	11
HIPÓTESIS .....	11
REVISIÓN DE LITERATURA .....	12
Las nanopartículas en la historia. ....	12
Las nanopartículas en diferentes áreas .....	12
Las nanopartículas en la agricultura .....	13
Las nanopartículas y su uso en México .....	14
Las nanopartículas y su uso en las semillas .....	15
Efectos negativos de las nanopartículas .....	16
Las nanopartículas no metálicas.....	17
El selenio (Se) como nanopartícula .....	17
En níquel (Ni) como nanopartícula.....	19
MATERIALES Y MÉTODOS .....	21
LOCALIZACIÓN DEL SITIO EXPERIMENTAL.....	21
VARIABLES EVALUADAS.....	21
Plántulas normales (PN). ....	21
Plántulas anormales (PA) .....	21
Semillas sin germinar (SSG) .....	21
Longitud de Tallo (LT) y Longitud de Raíz (LR) .....	22
Peso seco (PS) .....	22
Índice de crecimiento de raíz: relación que tuvieron LP/LR .....	22
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	23
CONCLUSIONES.....	30
LITERATURA CITADA.....	31

## ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables evaluadas en semillas y plántulas de tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> ) tratadas con NPsNi. ....	23
CUADRO 2. Comparación de medias para las variables evaluadas en semillas y plántulas de tomate tratadas con NPsNi. ....	24
CUADRO 3. Coeficientes de correlación de Pearson para las variables evaluadas en semillas y plántulas de tomate tratadas con NPsNi.....	25
CUADRO 4. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables evaluadas en semillas y plántulas de tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> ) tratadas con NPsSe. ....	26
CUADRO 5. Comparación de medias para las variables evaluadas en semillas y plántulas de tomate tratadas con NPsSe. ....	27
CUADRO 6. Coeficientes de correlación de Pearson para las variables evaluadas en semillas y plántulas de tomate tratadas con NPsSe.....	28

## RESUMEN

El presente trabajo se realizó en el Laboratorio de Fisiología y Bioquímica de Semillas del Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), con el propósito de evaluar la respuesta a la aplicación de dos tipos de nanopartículas (NPs): de selenio (Se) y de níquel (Ni), como una alternativa para estimular el vigor de germinación de semillas y el crecimiento de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*). El bioensayo constó de 2 tipos de NPs y 8 concentraciones (0, 10, 20, 30, 40, 50, 75, 100 ppm). Posterior a la preparación de las NPs en agua destilada, se sonicaron por 20 minutos, para una mejor dispersión.

Enseguida, las semillas fueron sembradas sobre Seedburo Indented Pads en un contenedor plástico para germinación con tapa, cada contenedor con 4 repeticiones de 25 semillas cada una. Cada repetición se asperjó con una suspensión de NPs del tratamiento correspondiente, al concluir se introdujeron en la cámara germinadora, a una humedad relativa de 75%, y una temperatura de 25 °C. El fotoperiodo de 16 horas de luz por 13 días. El experimento se estableció en un diseño completamente al azar con arreglo factorial de 2x8.

Pasados los 13 días, se sacaron los contenedores de la cámara germinadora y se inició con el conteo y la medición de las plántulas. Se determinó el porcentaje de germinación, de plántulas anormales y de semillas sin germinar. También longitud de plúmula y de radícula (cm), el peso seco de plántula (mg/plántula), y un índice de crecimiento obteniendo el cociente de las longitudes plúmula/raíz. Con los datos se realizó un análisis de varianza, para determinar diferencias estadísticas entre tratamientos para los dos tipos de NPs. También una comparación de medias mediante la Prueba de Tukey para determinar diferencias estadísticas entre los tipos de nanopartículas y sus concentraciones, además se obtuvieron los coeficientes de correlación de Pearson entre las variables evaluadas.

Los resultados indican que las NPs de selenio tuvieron un efecto positivo en el crecimiento de la plúmula. Mientras que, las NPs de níquel obtuvieron resultados superiores para el crecimiento de la radícula. En la acumulación de biomasa (peso seco de plántula), el níquel destacó sobre el selenio.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años las nanopartículas (NPs) han tenido un auge debido al interés que hay en el sector agrícola. Las NPs, hoy en día, ofrecen una alternativa más sostenible para el medio ambiente, ya que, con estas, el uso de fertilizantes, plaguicidas e insecticidas tiene un mejor aprovechamiento, esto porque se liberan de forma controlada conforme la planta lo requiera, generando así, menos gastos y el uso dosificado de los productos. La nanotecnología (NT) ha hecho más eficiente el uso de los fertilizantes y de los pesticidas, por el hecho de reducir la exposición de agroquímicos en humanos y el medio ambiente.

Con las NPs se ha podido observar que las plantas han mejorado su salud sin tener efectos tóxicos o alguna mal formación en su crecimiento. Hay estudios muy convincentes donde el uso adecuado de NPs es benéfico para el desarrollo de las semillas, además, un bajo impacto ambiental y una agricultura más sostenible. Se ha comprobado que las NPs metálicas (MNPs) tienen muy buena interacción con las células de las plantas, más específicamente en el proceso de la germinación, protegiendo a la semilla de agentes patógenos y a condiciones de estrés.

De igual manera, las NPs no metálicas han brindado un gran beneficio para las plantas, ejemplo de ello son las de carbono que ayudan a que los nutrientes que se encuentran en el ambiente o los que son aplicados puedan ser fijados de mejor manera, y que esto sea propiamente un beneficio para la planta. También han contribuido a un buen desarrollo radicular y en la actividad de enzimas antioxidantes.

Aunque brinden muy buenos resultados, las NPs en concentraciones elevadas o sin tener un uso adecuado provocan que las semillas sean más vulnerables, también afectan la germinación, el crecimiento radicular y el desarrollo de brotes. En algunas especies de plantas se ha observado que una concentración alta de NPs afecta su desarrollo total. De igual manera una de sus consecuencias es la interferencia con la fijación de nitrógeno y la mineralización de la materia orgánica provocando que

haya una disminución en la fertilidad de los suelos y con menos carga microbiana que favorezca la nutrición de los suelos y por ende a la de las plantas.

Hablando específicamente del selenio y del níquel, estos elementos también han contribuido de manera muy positiva en el sector agrícola. El selenio, aunque no sea esencial para las plantas ha demostrado tener muy buenos beneficios en el proceso de germinación. Utilizando selenio se ha comprobado que ayuda a mejorar la capacidad nutrimental de las plantas y en dosis altas genera fitotoxicidad.

El níquel, que sí es requerido por la planta en dosis muy bajas, ha ayudado a que la planta no tenga problemas en la absorción ni en la acumulación de nitrógeno. Estos microelementos representan un método muy eficiente para las plantas y las semillas, teniendo mejor salud, mayor tolerancia a las sequías, protección a patógenos y un mejor desarrollo, claro está, que las concentraciones usadas deben ser específicas y para no generar algún tipo de problema en la planta

En este trabajo de investigación se evaluó el efecto de las NPs de Ni y de Se en la germinación y crecimiento de plántula, así como en la acumulación de biomasa.

## **OBJETIVO GENERAL**

Analizar el efecto de los tratamientos de nanopartículas de Se y de Ni a diferentes concentraciones en la germinación y crecimiento de plántula en tomate (*Solanum lycopersicum*).

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Evaluar el efecto de la aplicación de NPs de Níquel (Ni) y de Selenio (Se) en diferentes concentraciones, en la germinación de semillas de tomate (*Solanum lycopersicum*).
- Determinar la concentración óptima en cada una de las NPs (Ni o Se) para promover el crecimiento de plúmula y de raíz.

## **HIPÓTESIS**

H<sub>a</sub>: Al menos uno de los tratamientos con níquel o con Selenio promoverá el crecimiento de plúmula y/o la acumulación de biomasa.

H<sub>0</sub>: Ningunos de los tratamientos promueva con níquel o con selenio promoverá el crecimiento de plúmula y/o acumulación de biomasa.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### **Las nanopartículas en la historia.**

El uso de nanopartículas (NPs) no es algo nuevo, existen registros históricos de civilizaciones antiguas que ya las utilizaban sin saber de su existencia. Por ejemplo, la copa de Licurgo del Imperio romano, que cambiaba de color según la dirección de la luz, esto por la presencia de NPs de Oro y Plata dispersas en el vidrio (Pacheco-Londoño et al., 2020). A su vez, durante la Edad Media se empleaban las NPs en los vitrales de iglesias, creando efectos ópticos, de los cuales no se conocía la ciencia que se encontraba detrás de esos trabajos (Salata, 2004).

En el siglo XX, específicamente en el año 1959, el físico Richard Feynman consolidó el término de nanotecnología y a su vez planteo la posibilidad de manipular átomos y moléculas, abriendo así, el camino a esta ciencia (Feynman, 1960). En el año de 1974 el investigador japonés, Norio Taniguchi de la Universidad de Tokio, acuñó el término “Nanotecnología” (NT). Posterior a esto con el desarrollo del microscopio de efecto túnel (1981) y los descubrimientos de estructuras como los nanotubos de carbono, empezaron las experimentaciones en este campo (Taniguchi, 1974; Iijima, 1991).

### **Las nanopartículas en diferentes áreas**

Con el avance de herramientas tecnológicas, la nanotecnología comenzó la aplicación en diversas áreas como la medicina, la energía, la electrónica, el medio ambiente y, más recientemente, en la agricultura. Después del año 2010, creció el interés por su aplicación en los sistemas agrícolas, explorando alternativas más sostenibles y eficientes. Desde el enfoque actual, las NPs se han implementado para mejorar la absorción de nutrientes (nanofertilizantes), controlar plagas y enfermedades (nanopesticidas), de igual manera para favorecer la germinación y el crecimiento de las plantas (Kah, 2018).

Las NPs han surgido como una herramienta que promete transformar amplios sectores productivos de la agricultura. En el mundo, la agrícola ha tenido un

incremento acelerado, esto por los requerimientos que se deben de hacer ante el cambio climático, la escasez de recursos naturales, la seguridad alimentaria y el aumento de prácticas agrícolas sostenibles (Valuates Reports, 2023).

### **Las nanopartículas en la agricultura**

En la agricultura se ha implementado el uso de NPs metálicas (MNPs), como plata (AgNPs), óxido de zinc (ZnO), cobre (CuNPs), y óxido de magnesio (MgO), esto por sus propiedades microbianas, antioxidantes y de liberación controlada (Khan, 2020). Por ejemplo, con el uso de NPs de plata (AgNPs) sintetizadas en extractos acuosos de ajeno (*Artemisa absinthium*) para varias especies de phytophthora, que causan enfermedades importantes, se observó que puede prevenir la infección por phytophthora y mejorar la salud de las plantas sin producir efectos en el crecimiento (Imada, 2016). La síntesis verde de NPs, utilizando extractos vegetales, ha ganado interés por su bajo impacto ambiental y su compatibilidad con la agricultura sostenible (Rastogi *et al.*, 2022).

En la agricultura, el mercado mundial se valoró en más de 330 mil millones de dólares en 2024, lo cual muestra una aprobación de nuevas tecnologías como nanofertilizantes, nanopesticidas y nanosensores (The Business Research Company, 2024).

En el área de la investigación científica, se han creado materiales con propiedades particulares como la liberación prolongada, la respuesta a estímulos externos y la biocompatibilidad, lo cual hace que existan nuevas posibilidades en los diseños de sistemas inteligentes en la agricultura. Sin embargo, este desarrollo tiene algunos problemas importantes como la falta de regulación internacional en el uso de nanomateriales en alimentos y cultivos, así como los pocos estudios a largo plazo que hablen sobre la toxicidad y la repercusión en la salud de los seres humanos y el ambiente (Sekhon & Kaur, 2022).

## **Las nanopartículas y su uso en México**

En México, la aplicación de la nanotecnología está en un punto de fortalecimiento, avanzando en el nivel de experimentación, pero con ciertas limitantes al sector productivo. Universidades como el Tecnológico de Monterrey han desarrollado NPs biocompatibles con óxido de titanio y quitosano, adecuado para actuar como un estimulante del sistema inmunológico de las plantas, mejorando su resistencia al estrés y optimizando la absorción de los nutrientes. La tecnología utilizada ha sido todo un éxito en cultivos como el tomate, chile y arándano en invernadero (Portal Frutícola, 2025), a su vez, el Centro De Investigación en Química Aplicada (CIQA) y la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) han implementado MNPs para potenciar y mejorar la germinación y el rendimiento de cultivos básicos como el maíz y el frijol (InfoAgro México, s.f).

### **Sus propiedades**

El creciente interés por las MNPs en la agricultura es por las propiedades fisicoquímicas y la capacidad de interactuar con las células de los organismos vivos. Específicamente en la fase de la germinación de semillas, porque debido a esto, las NPs tienen la capacidad de estimular o inhibir los procesos fisiológicos esenciales, dependiendo de factores como la concentración, tamaño, forma, composición y método de síntesis (Guo *et al.*, 2022).

Las MNPs se caracterizan por poseer propiedades fisicoquímicas con un rango de 1 a 100 nanómetros. Con estas propiedades se puede tener un alto cociente de superficie volumen, efectos cuánticos, y una elevada reactividad superficial, lo que las vuelve útiles en la agricultura y la remediación ambiental (Shahalaei *et al.*, 2024), por ejemplo, las MNPs presentan la capacidad de captar iones metálicos, colorantes, pesticidas y fármacos por medio de interacciones electrostáticas. El ZnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o TiO<sub>2</sub> han sido capaces de remover hasta 99% para ciertos colorantes industriales (Ayub *et al.*, 2024).

## Las nanopartículas y su uso en las semillas

Las semillas tratadas con NPs son un gran tema de investigación por la eficiencia que existe para la germinación, promover el crecimiento inicial de las plántulas y crear cierta protección contra agentes patógenos o condiciones de estrés, pero siempre controlando las dosis de concentración para evitar alguna fitotoxicidad en la planta (Zuverza-Mena., 2016).

Aunque prometen una solución muy importante en diversas áreas, las MNPs, sin un uso adecuado o soluciones bajo observación, son vulnerables cuando existe demasiada exposición hacia estos metales, afectando la germinación de las semillas, el crecimiento radicular y el desarrollo de brotes. Se han hecho estudios con óxido de zinc (ZnO-NPs), en el cual se ha encontrado que existe una inhibición significativa en la elongación de raíces y un descenso en la tasa de germinación en especies como *Arabidopsis thaliana* y *Triticum aestivum* (Kang, 2023). Estas mismas partículas también pueden interferir con la fijación del nitrógeno y la mineralización de la materia orgánica. Estos procesos generan un desequilibrio ecológico, infertilidad del suelo y la disminución de la biodiversidad microbiana (Boparai *et al.*, 2022).

Las NPs pueden interactuar sinérgicamente con otros contaminantes, como los pesticidas y los metales pesados, esto puede incrementar el nivel de toxicidad. El tamaño tan pequeño que tienen les permite ingresar de manera más fácil hacia los organismos y que se muevan a través de la cadena trófica, desde organismos como las plantas, animales y seres humanos (Fu *et al.*, 2023).

Hay efectos estimulantes y benéficos. Por ejemplo, en diversos estudios han mostrado los efectos positivos que tienen las MNPs en la germinación y el crecimiento inicial de las plantas. En un metaanálisis se observó cómo trabajan varias MNPs (Ag, Zn, Cu, Fe, entre otras) sobre las semillas. En las NPs de plata se encontró que promovían significativamente la germinación y que las de óxido de zinc favorecían el desarrollo radicular. Estos resultados favorables se observaron especialmente cuando las NPs se aplicaron en bajas concentraciones, por debajo de 50 mg/L (Gou, 2022).

De igual manera, un estudio con chile morrón (*Capsicum annuum*) y tomate (*Solanum lycopersicum*), demostró que las NPs de zinc (ZnO-NP) promovieron la germinación y aumentaron la actividad antioxidante en las plantas. Otra importancia notable que tuvieron las NPs es que actuaron como fuente de micronutrientes esenciales y como un catalizador de procesos metabólicos importantes en las etapas tempranas de la planta (Mousa, 2023).

En la germinación de cereales como la cebada y el trigo, el uso de MNPs establecidas con quitosano, incrementaron la germinación hasta en un 22 %, y pudo prevenir infecciones durante la germinación, así como, efectos antifúngicos (Ahmed, 2022).

### **Efectos negativos de las nanopartículas**

Aunque existe demasiados efectos benéficos con el uso correcto de MNPs, también el uso desmedido puede generar algunos efectos negativos. En un estudio con MNPs de CuO, TiO<sub>2</sub> o ZnO, se demostró que se reduce la longitud de brotes y raíces en especies como avena (*Avena sativa*) y trébol (*Trifolium alexandrinum*) (Singh, 2016). En otro estudio se trabajó con NPs de hierro cero valente (nZVI) y NPs de plata, en semillas de pasto, lino y cebada. Observando así que en las concentraciones de 250 mg/L para Nzvi y 10 mg/L para Ag-NP, la germinación tuvo una disminución significativa, también se logró observar que las NPs afectaron la longitud del brote, pero no la germinación, lo que demuestra que hay una inhibición en el desarrollo postgerminativo (Zuverza-Mena, 2016).

El mecanismo de acción que tienen las MNPs sobre las semillas, es la alteración de la permeabilidad de la testa, lo que puede modificar la estructura de la cubierta de la semilla y permitir una imbibición de agua más rápida y uniforme; la liberación de iones metálicos, ya que MNPs como ZnO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> o CuO pueden liberar iones esenciales que actúan como micronutrientes, estimulando el metabolismo celular, y la estimulación de enzimas antioxidantes, dado que se ha demostrado un aumento en la actividad de enzimas como la  $\alpha$ -amilasa y antioxidantes como la superóxido

dismutasa (SOD) y la catalasa (CAT), lo cual puede mejorar la resistencia al estrés oxidativo inducido por las propias NPs (Mousa, 2023).

### **Las nanopartículas no metálicas**

Los nanomateriales como las NPs no metálicas, que han sido las de mayor investigación como las de sílice, carbono y polímeros biodegradables, estas han sido capaces de bajar el riesgo toxicológico en comparación con las MNPs (Rai, 2021). Las NPs de sílice se usa comúnmente en transportadores de fertilizantes, pesticidas y como agentes que mejoran la fisiología de la planta. Números estudios han observado que este tipo de NPs puede beneficiar la tolerancia al estrés salino, la sequía y la toxicidad por metales pesados. Un ejemplo, con un estudio en tomate, en condiciones de salinidad, halló que aplicaciones foliares de SiO-NPs incremento de manera considerable la tasa de germinación, su contenido de clorofila y la actividad antioxidante a diferencia del uso de sílice convencional (Elsheery, 2020).

En el caso de las NPs de carbono (CNPs), se usan con más regularidad por sus propiedades de transporte y la mejora en la absorción de nutrientes. En un estudio donde se trabajó con maíz (*Zea mays*), las NPs de carbono se aplicaron para reducir los efectos tóxicos del cobre, lo que ayudó a mejorar la longitud de raíces y la actividad de enzimas antioxidantes (Hussain, 2022).

Estas NPs no metálicas tienen diversos mecanismos de acción como, por ejemplo: mejora la fotosíntesis, aumentando el contenido de clorofila y la capacidad de aprovechar mejor la luz. Los efectos beneficiosos de las NPs no metálicas en plantas se asocian a múltiples mecanismos: regulación genética, muestra genes relacionados con el estrés abiótico, relacionados al metabolismo de ABA y la producción de compuestos osmoprotectores (Zhu, 2022).

### **El selenio (Se) como nanopartícula**

El selenio (Se) se encuentra como elemento metaloide en la naturaleza, pero de formas inorgánicas como seleniuro ( $\text{Se}^{2-}$ ), selenio elemental ( $\text{Se}_0$ ), selenito ( $\text{SeO}_3^{2-}$ ) o selenato ( $\text{NO}_2\text{SeO}_4$ ) y otros como compuestos orgánicos selenocisteína

(SeCyt) y selenometionina (SeMet). Este microelemento es fundamental para gran variedad de organismos, por ejemplo, arqueas, bacterias, algas, insectos y mamíferos. Este elemento no es esencial en las plantas, pero ha sido utilizado en la biofortificación de los cultivos por su efectividad en la salud humana. En las plantas el uso de Se favorece su crecimiento. Sin embargo, los efectos del Se siempre van a depender de su forma química, concentración aplicada y especie de la planta. En concentraciones bajas es benéfico, pero se vuelve tóxico en dosis elevadas. Por ejemplo, las concentraciones altas de Se que son absorbidas por la raíz provocan síntomas de fitotoxicidad y un retraso en el crecimiento, clorosis, marchitez, estrés oxidativo y muerte temprana de la planta (Morales, 2023).

El selenio (Se) es un micronutriente esencial para diversos organismos, incluidos los humanos y en menor uso, las plantas. Aunque no sea de importancia en todas las especies vegetales, se ha comprobado que mejora el crecimiento, la resistencia al estrés y brinda una mejor calidad nutricional en los cultivos en concentraciones bajas (Feng *et al.*, 2021)

El uso de microelementos como el selenio (Se) puede ser beneficioso, mas no esencial en las plantas o semillas. El Se se cataloga como un bioestimulante vegetal inorgánico porque demuestra que mejora la absorción de nutrientes, aumenta la tolerancia de las plantas al estrés y mejora el rendimiento de los cultivos, porque cuando se utiliza en concentraciones bajas funciona como señalizador para mejorar el sistema de defensa de la planta, generando un incremento en los contenidos de metabolitos secundarios, pero en altas concentraciones provoca daño oxidativo en los tejidos (Sariñana Navarrete, 2023).

Se ha identificado que las SeNPs estimulan el crecimiento vegetal, favoreciendo la germinación, el desarrollo radicular y el aumento de biomasa, mediante la regulación del metabolismo fotosintético y la producción de fitohormonas (El-Saadony, 2021).

Bajo circunstancias de estrés abiótico, las SeNPs mejoraron el estrés osmótico y disminuyeron la acumulación de iones tóxicos como el sodio, en situaciones de salinidad o sequía, beneficiando así la homeostasis celular (Zhou, 2023). Por su

parte, el efecto antimicrobiano ayuda a la protección de patógenos, actuando en inducciones de defensa en la planta (Khurana, 2023).

Con SeNPs se puede lograr una buena biofortificación, esto mejora la calidad nutricional de las plantas, proporcionándolas con un incremento de dicho elemento en sus tejidos comestibles, sin que esta rebase los niveles tóxicos para el consumidor (Rizwan, 2022). Múltiples estudios han logrado probar la eficacia de las SePNs en la agricultura, un ejemplo fue un experimento, en el que se utilizó sésamo (*Sesamun indicum*), con la aplicación de las SePNs mejoró considerablemente parámetros de crecimiento como la longitud radicular, el número de hojas y el contenido de compuestos antioxidantes como sesamina y sesamol (Almutari, 2023)

Un mayor contenido de clorofila, la eficiencia fotosintética y el rendimiento del fruto fueron consecuencias positivas al usar las SeNPs de forma foliar en plantas de tomate y, a su vez, la reducción de sodio acumulado en los tejidos (Zhou, 2023).

Investigaciones en trigo (*Triticum aestivum*) y colza (*Brassica napus*) demostraron que las SeNPs tuvieron la capacidad de regular la capacidad de genes implicados en el transporte iónico, lo cual mejor la tolerancia al estrés salino y a la toxicidad por metales pesados (Rizman, 2022).

### **En níquel (Ni) como nanopartícula**

El níquel (Ni) es un elemento traza que, aunque se encuentra en concentraciones muy bajas tanto en organismos vegetales como en humanos, tiene funciones biológicas esenciales. El níquel es requerido por la planta como micronutriente para que haya procesos metabólicos claves, en especial los relacionados con el nitrógeno (Brown, 1987). Una de sus funciones más importantes es como cofactor de la enzima ureasa, encargada de catalizar la conversión de urea en amonio, una forma asimilable de nitrógeno. Este proceso es importante específicamente en cultivos que se fertilizan con urea, donde la carencia de níquel puede provocar la acumulación tóxica de urea en los tejidos vegetales (Bai *et al.*, 2006). En humanos, el níquel también se considera un oligoelemento esencial, aunque el aporte nutricional no está completamente definido. Actúa en la activación de ciertas

enzimas y en la regulación de hormonas, también se ha observado que influye en el metabolismo del hierro y la insulina y formación de membranas celulares (Kasprzak, 2023). En las plantas se ha visto que con deficiencias puede haber problemas y en los humanos los efectos con concentraciones bajas son menos comprendidos, mientras que concentraciones altas si han demostrado relación con procesos tóxicos, alergias cutáneas y posibles efectos carcinogénicos cuando se acumulan en órganos (ATSDR, 2025).

El níquel (Ni) es un micronutriente esencial para las plantas, descubierto como tal en las últimas décadas. Aunque requerido en cantidades extremadamente bajas, cumple funciones vitales, especialmente en cultivos fertilizados con fuentes nitrogenadas como la urea. La deficiencia de níquel puede conducir a la acumulación tóxica de urea en los tejidos vegetales, afectando el desarrollo y el rendimiento (Brown *et al.*, 1987; Gerendás & Sattelmacher, 1999).

En las leguminosas como la soya, el níquel ayuda indirectamente en la fijación simbiótica del nitrógeno, por lo que algunas enzimas presentes en los nódulos requieren de este microelementos para un funcionamiento adecuado (Eskew *et al.*, 1983), también un estudio hecho con pimiento morrón (*Capsicum annuum*) en condiciones hidropónicas demostró que la incorporación de níquel en concentraciones de 0.5 a 1.5 mg/L en las soluciones nutritiva demostró mejorar la acumulación de nutrientes en los frutos sin producir síntomas de toxicidad (Juárez-Maldonado *et al.*, 2016).

Algunos trabajos reportan que las NPs de níquel aumentan la tolerancia de las plantas al estrés por salinidad, sequia o metales pesados, mediante la activación de defensas antioxidantes y reducción del daño oxidativo (Rastogi, 2017).

Otro estudio con maní (*Arachis hypogaea*), se señaló que las NPs de ferrita de níquel (NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>NPs) a 50 mg/kg incrementan el crecimiento vegetal, aumentan el número de vainas por planta y mejoran la calidad nutricional de las semillas, a su vez, se reporta una mejora en el índice de cosecha y una disminución en el riesgo para la ingesta humana, manteniéndose por debajo de niveles críticos (Maswada, 2023).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### LOCALIZACIÓN DEL SITIO EXPERIMENTAL.

El presente trabajo de investigación se realizó en el Laboratorio de Fisiología y Bioquímica de Semillas del Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), en Saltillo, Coahuila, México.

En este estudio se utilizaron NPs de níquel (NPsNi) y de selenio (NPsSe). Las NPs se suspendieron en agua destilada (50 ml) en un tubo tipo Falcón, en diferentes concentraciones: 0.0, 10, 20, 30, 40, 50, 75 y 100 ppm. Posteriormente el tubo Falcón se colocó en un sonicador por 20 minutos para una mejor dispersión. El experimento se estableció con semillas de jitomate de la variedad Floradade. Las semillas fueron sembradas sobre Seedburo Indented Pads en un contenedor plástico para germinación con tapa, cada contenedor con 4 repeticiones de 25 semillas cada una. Cada repetición se asperjó con una suspensión de NPs del tratamiento correspondiente, al concluir se introdujeron en la cámara germinadora, a una humedad relativa de 75%, y una temperatura de 25 °C. El fotoperiodo de 16 horas de luz por 13 días. El experimento se estableció en un diseño completamente al azar con arreglo factorial de 2x8. Pasados los trece días, se evaluaron las plántulas.

### VARIABLES EVALUADAS

**Plántulas normales (PN):** con estructuras básicas formadas de manera correcta como la raíz, el tallo y hojas, se expresó en porcentaje.

**Plántulas anormales (PA):** se consideraron las plántulas que presentaron algunas deformaciones en el crecimiento o en algunas de sus estructuras (plúmula o radícula), se expresó en porcentaje.

**Semillas sin germinar (SSG):** aquellas semillas muertas o que no tuvieron la capacidad de germinar o emerger, se expresó en porcentaje.

**Longitud de Tallo (LT) y Longitud de Raíz (LR):** se midieron diez plántulas al azar de cada tratamiento con regla milimétrica, se expresaron en cm.

**Peso seco (PS):** esta variable se obtuvo después de medir las plántulas. Todas las plántulas normales de cada repetición se colocaron dentro de una bolsa de papel de estraza con perforaciones, en seguida se colocaron dentro de una estufa Harsa de secado, por 24 horas a una temperatura de 72 °C. Posteriormente fueron pesadas en una balanza analítica marca AND HR 200, se expresó en mg/plántula.

**Índice de crecimiento:** relación del crecimiento de la plúmula con respecto a la radícula (LP/LR).

Con los datos de cada variable se realizó un análisis de varianza, para determinar diferencias estadísticas entre tratamientos para los dos tipos de NPs. También una comparación de medias mediante la Prueba de Tukey para determinar diferencias estadísticas entre los tipos de nanopartículas y sus concentraciones, además se obtuvieron los coeficientes de correlación de Pearson entre las variables evaluadas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Nanopartículas de Níquel

En el Cuadro 1 se presentan los cuadrados medios del análisis de varianza para las variables evaluadas en el ensayo de germinación de semillas de tomate (*Solanum lycopersicum*), tratadas con NPs de níquel (NPsNi). Se observan diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.01$ ) para las variables LP, LR, PS y para el ÍNDICE de crecimiento, también se encontraron diferencias no significativas para las variables GER, PA y SSG. Los coeficientes de variación presentan valores aceptables para la mayoría de las variables.

CUADRO 1. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables evaluadas en semillas y plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*) tratadas con NPsNi.

F.V.	G.L.	GER (%)	PA (%)	SSG (%)	LP (%)	LR (%)	PS (mg/pla)	ÍNDICE
TRAR	7	34.0 ns	5.78 ns	4.52 ns	0.14**	2.30**	0.18**	0.001 **
ERROR	24	24.0	5.71	17.66	0.02	0.32	0.01	0.0003
C.V (%)		5.25	48.55	53.95	6.50	4.93	7.88	8.69

F.V.= fuente de variación; G.L.= grados de libertad; GE = germinación; PA= plántulas anormales; SSG= semillas sin germinar; LP= longitud de plúmula; LR= longitud de radícula; PS= peso seco de plántula; ÍNDICE = relación LP/LR; mg/pla= mg/plántula.

En la comparación de medias (Cuadro 2) se observa que con la aplicación de NPsNi no se presentaron diferencias significativas en la variable porcentaje de germinación, ya que, todos los tratamientos presentan valores estadísticamente iguales, al igual que en las variables plántulas anormales (PA) y semillas sin germinar (SSG). Sin embargo, el resto de las variables si mostraron respuestas significativas a la aplicación de NPsNi.

La variable longitud de plúmula muestra que con aplicar el tratamiento con 10 ppm de NPsNi, es suficiente para promover muy posiblemente la división y la elongación celular, ya que superó estadísticamente al testigo por 43 mm.

CUADRO 2. Comparación de medias para las variables evaluadas en semillas y plántulas de tomate tratadas con NPsNi.

TRAT (ppm)	GER (%)	PA (%)	SSG (%)	LP (cm)	LR (cm)	PS (mg/pla)	ÍNDICE
0	89 a	2 a	9 a	2.30 b	11.40 ab	1.57 b	0.20 bc
10	92 a	2 a	6 a	2.73 a	11.63 ab	1.62 ab	0.23 abc
20	91 a	1 a	8 a	2.50 ab	10.63 b	1.24 c	0.23 ab
30	95 a	5 a	0 a	2.49 ab	11.67 ab	1.87 a	0.21 abc
40	92 a	4 a	4 a	2.41 ab	12.71 a	1.39 bc	0.19 c
50	98 a	2 a	0	2.32 b	10.83 b	1.39 bc	0.21 abc
75	96 a	0	4 a	2.75 a	12.65 a	1.53 b	0.21 abc
100	93 a	0	7 a	2.77 a	11.23 b	1.21 c	0.24 a
$\bar{X}$	93.2	5	7.8	2.53	11.59	1.47	0.21
Tukey	11.4	1.8	13.8	0.38	1.33	0.27	0.04

VARIABLES con la misma literal en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey  $\alpha=0.05$ ); TRAT= tratamiento; GER= germinación; PA= plántulas anormales; SSG= semillas sin germinar; LP= Longitud de plúmula; LR= longitud de radícula; PS= peso seco de plántula; ÍNDICE= relación LP/LR; mg/pla= mg/plántula.

En la variable longitud de radícula (LR) las concentraciones de 40 y 75 ppm promovieron un mayor crecimiento, sin embargo, resultaron estadísticamente iguales al testigo. Los datos sugieren que con concentraciones moderadas de NPsNi se puede estimular y desarrollar el crecimiento de la raíz.

En el peso seco de plántula (PS) se observan diferencias significativas entre tratamientos, la concentración con 30 ppm obtuvo el valor más alto con 1.87 mg/plántula, superando estadísticamente al testigo. Mientras que, estadísticamente la concentración con 100 ppm muestra el valor más bajo, lo que sugiere un efecto de toxicidad al incrementar las NPsNi. Esto indica que con concentraciones bajas

se obtiene un porcentaje mayor de biomasa expresado en peso seco de plántula (PS).

En índice de crecimiento de plúmula con respecto a la raíz, se observa que aplicando entre 10 y 100 ppm se obtienen valores estadísticamente iguales, a excepción del tratamiento con 40 ppm, que fue el valor más bajo. Esto demuestra que dosis moderadas pueden generar un mejor equilibrio para el crecimiento de la plúmula.

Los resultados demuestran que las NPsNi en concentraciones bajas favorecen el crecimiento de las plántulas de tomate, sin afectar la germinación. Sin embargo, concentraciones superiores a 40 ppm, tienen un efecto adverso sobre la acumulación de biomasa.

En el Cuadro 3 se muestran los coeficientes de correlación de Pearson entre las variables evaluadas, donde obviamente el crecimiento de la plúmula (LP) se correlaciona positiva y significativamente con el índice de crecimiento de plúmula con respecto a la raíz ( $r = 0.7929^{**}$ ).

CUADRO 3. Coeficientes de correlación de Pearson para las variables evaluadas en semillas y plántulas de tomate tratadas con NPsNi.

	PS (mg/pla)	LP (cm)	LR (cm)	ÍNDICE
GER (%)	-0.0928	-0.1208	-0.0406	-0.0690
PS (mg/pla)		0.0010	0.2475	-0.1964
LP (cm)			0.1079	0.7429 <sup>**</sup>
LR (cm)				-0.5805 <sup>**</sup>

<sup>\*\*</sup>Significativo al 0.01 de probabilidad; PS= peso seco de plántula; LP= longitud de la plúmula; LR= longitud de la radícula. ÍNDICE= relación LP/LR; mg/pla=mg/plántula.

En un trabajo realizado con nanopartículas de níquel, se demostró que la aplicación de 50 mg/kg mejora la eficiencia fotosintética, lo que permite a la planta desarrollar

mayor cobertura, con mayor acumulación de biomasa, aunado a un incremento en la calidad de nutrientes (Rafique, 2025).

Tang (2025) trabajando con plantas de maíz (*Zea mays* L.), encontró que las nanopartículas de níquel tienen efectos que benefician en la longitud de raíces, donde la concentración de 20 mg/L presentó los mejores resultados. También, con esta concentración se observó un aumento en la acumulación de antioxidantes.

### Nanopartículas de Selenio

En el Cuadro 4 se presentan los cuadrados medios del análisis de varianza para las variables evaluadas en el ensayo con semillas de tomate (*Solanum lycopersicum*) tratadas con NPs de selenio (NPsSe). Se observó que en las variables porcentaje de germinación (GER), plántulas anormales (PA), semillas sin germinar (SSG), longitud de plúmula (LP), y longitud de radícula (LR) no hubo diferencias significativas entre tratamientos. Sin embargo, se encontraron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) en el peso seco de la plántula y en el índice de crecimiento de plúmula con respecto a la raíz. Esto sugiere que los tratamientos con NPsSe influyeron en la acumulación de biomasa.

CUADRO 4. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables evaluadas en semillas y plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*) tratadas con NPsSe.

F.V.	G.L.	GER (%)	PA (%)	SSG (%)	LP (cm)	LR (cm)	PS (mg/pla)	ÍNDICE
TRAT	7	37.64 ns	4.00 ns	19.18 ns	0.09 ns	0.56 ns	0.09*	0.0010
ERROR	24	20.83	4.00	14.05	0.04	0.40	0.03	0.0004
C.V		4.83	40.00	49.19	6.51	5.72	12.53	7.71

F.V.= fuente de variación; G.L.= grados de libertad; GE = germinación; PA= plántulas anormales; SSG= semillas sin germinar; LP= longitud de plúmula; LR= longitud de radícula; PS= peso seco de plántula; ÍNDICE = relación LP/LR; mg/pla= mg/plántula.

En la comparación de medias (Cuadro 5) se corrobora las diferencias significativas entre tratamientos para las variables peso seco de plántula e índice de crecimiento de plúmula. El mayor peso seco de plántula (1.79 mg/plántula) se obtuvo con el tratamiento de 75 ppm, aunque estadísticamente igual al testigo que presentó 1.42 mg/plántula, con una diferencia de 0.37 mg/plántula.

CUADRO 5. Comparación de medias para las variables evaluadas en semillas y plántulas de tomate tratadas con NPsSe.

TRAT (ppm)	GER (%)	PA (%)	SSG (%)	LP (cm)	LR (cm)	PS (mg/pla)	ÍNDICE
0	96 a	0 a	4 a	3.19 a	10.83 a	1.42 ab	0.29 a
10	97 a	0 a	3 a	2.91 a	11.13 a	1.47 ab	0.26 a
20	98 a	0 a	2 a	2.92 a	11.07 a	1.34 b	0.26 a
30	94 a	0 a	6 a	3.25 a	10.67 a	1.50 ab	0.30 a
40	90 a	4 a	6 a	3.29 a	11.35 a	1.30 b	0.29 a
50	92 a	0 a	8 a	3.15 a	10.77 a	1.39 ab	0.29 a
75	91 a	0 a	9 a	2.95 a	10.81 a	1.79 a	0.27 a
100	97 a	0.0 a	3.0 a	3.06 a	11.80 a	1.55 ab	0.25 b
$\bar{X}$	94	1	5	3.09	11.05	1.47	0.27
Tukey	10.6	8.6	13.3	1.48	0.47	0.43	0.05

Variables con la misma literal en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey  $\alpha=0.05$ ); TRAT= tratamiento; GER= germinación; PA= plántulas anormales; SSG= semillas sin germinar; LP= Longitud de plúmula; LR= longitud de radícula; PS= peso seco de plántula; ÍNDICE= relación LP/LR; mg/pla= mg/plántula.

En cuanto a la relación LP/LR, el único tratamiento estadísticamente diferente fue el de 100 ppm, con 0.25, indicando que al incrementar la concentración de las NPsSe se reduce el crecimiento de la plúmula.

En el Cuadro 6 se muestran los índices de correlación de Pearson entre las variables evaluadas, se encontró una correlación positiva entre el porcentaje de germinación y la longitud de la radícula ( $r=0.4327^*$ ), la cual es una relación complicada de explicar, sin embargo, se puede relacionar con el vigor de germinación. Asimismo, se observó una correlación negativa y significativa entre el porcentaje de germinación y el Índice, que representa la relación entre el crecimiento de la plúmula y de la radícula ( $r= -0.3872^*$ ).

CUADRO 6. Coeficientes de correlación de Pearson para las variables evaluadas en semillas y plántulas de tomate tratadas con NPsSe

	PS (mg/pla)	LP (cm)	LR (cm)	ÍNDICE
GER (%)	0.1637	-0.1265	0.4327*	-0.3872*
PS (mg/pla)		-0.1640	0.0640	-0.1722
LP (cm)			0.0779	0.7625**
LR (cm)				-0.5831**

\*\*Significativo al 0.01 de probabilidad; PS= peso seco de plántula; LP= longitud de la plúmula; LR= longitud de la radícula. ÍNDICE= relación LP/LR; mg/pla=mg/plántula.

También se obtuvo un coeficiente de correlación positivo y significativo ( $r =0.7625^{**}$ ) entre la variable LP y la relación plúmula/radícula (ÍNDICE), lo cual indica que el valor del índice se incrementa al aumentar el crecimiento de la plúmula. De manera opuesta, se presentó una un coeficiente de correlación negativo y significativo ( $r= -0.5831^{**}$ ) entre la longitud de la radícula y el índice.

En un estudio realizado por Shidiqui *et al.* (2021), encontraron que en semillas de *Hordeum vulgare* las nanopartículas de selenio tuvieron un efecto positivo al presentar mayor longitud de brotes, de raíces y mayor porcentaje de germinación. Una concentración de 4.65  $\mu\text{g/mL}$  tuvo un mayor incremento en el porcentaje de germinación. Estos resultados demuestran que las nanopartículas de selenio en algunos cultivos potencializan la germinación de las semillas. Sin embargo, difieren de los encontrados en este trabajo de investigación, donde no hubo diferencias en

el porcentaje de germinación, ni en las variables relacionadas con el crecimiento de plántula.

Otro estudio de Lapaz (2019), señala que a altas concentraciones ( $800 \text{ mgL}^{-1}$ ) de selenio se genera una disminución en los pigmentos fotosintéticos, lo que crea una fitotoxicidad en plantas de caupí (*Vigna unguiculata*). Esto demuestra que, aunque brindan efectos positivos en la germinación, en el crecimiento de radícula y de tallo, las dosis altas son perjudiciales para el crecimiento y salud de la planta

## CONCLUSIONES

Los resultados indican que dosis bajas de NPsNi incrementan la longitud de la plúmula (10 ppm) y de la radícula (40 ppm).

Mayor acumulación de biomasa se obtuvo aplicando 30 ppm de NPsNi, indicando ser fundamental para el crecimiento y desarrollo de las plantas.

De acuerdo con la relación LP/LR, se observó mayor desarrollo de plúmula con respecto a la de radícula, aplicando NPsNi en suspensión a una concentración de 100 ppm.

En el estudio con NPsSe los resultados no fueron consistentes, sin embargo, se observó mayor crecimiento de plúmula y de radícula al aplicar NPsSe a una concentración de 40 ppm, y mayor acumulación de biomasa con 75 ppm.

## LITERATURA CITADA

Afzal, I. (2024). Selenium nanoparticles improve salt tolerance in wheat and quinoa by modulating antioxidant defense system. *BMC Plant Biology*. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04720-6>

Almutairi, K., Alharbi, B. M., Al-Harbi, L. M., Alenazi, M. M., & Khan, F. (2023). Green synthesis of selenium nanoparticles: Role in enhancing growth and bioactive compounds in sesame under stress. *ACS Omega*, 8(7), 7204–7215. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07084>

Ayub, M., Hussain, S., Mehmood, A. (2024). *Recent advances in the adsorption of different pollutants from wastewater using carbon-based and metal-oxide nanoparticles: A review*. *Applied Sciences*, 14(24), 11492. <https://doi.org/10.3390/app142411492>

ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). (2005). Toxicological Profile for Nickel. U.S. Department of Health and Human Services.

Brown, P. H., Welch, R. M. & Cary, E. E. (1987). Nickel: a micronutrient essential for higher plants. *Plant Physiology*, 85(3), 801–803.

Gerendás, J. & Sattelmacher, B. (1999). Influence of Ni supply on growth and nitrogen metabolism of *Brassica napus* L. grown with  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  or urea as N source. *Annals of Botany*, 83, 65–71.

Boparai, H. K. (2022). Toxicity of ZnO and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  nano-agrochemicals to soil microbial activities and human health risks. *Environmental Sciences Europe*, 34, 121. <https://doi.org/10.1186/s12302-022-00687-z>

Bai, C., Reilly, C. C., & Wood, B. W. (2006). Nickel deficiency disrupts metabolism of ureides, amino acids, and organic acids of young pecan foliage. *Plant Physiology*, 140(2), 433–443.

El-Saadony, M. T., Desoky, E.-S. M., Saad, A. M., Eid, R. S., Selem, E., & Rady, M. M. (2021). The use of selenium nanoparticles to promote plant growth, yield, and stress tolerance: A review. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40, 2793–2811. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10376-9>

Elsheery, N. I. (2020). Silicon nanoparticles enhance tomato tolerance to salinity by improving water status, photosynthesis, antioxidant defense, and membrane stability. *Plant Physiology and Biochemistry*, 156, 19–31. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.08.034>

Eskew, D. L., Welch, R. M., & Cary, E. E. (1983). Nickel: An essential micronutrient for legumes and possibly all higher plants. *Science*, 222(4624), 621–623.

Feynman, R. P. (1960). There is plenty of room at the bottom. *Engineering and Science*, 23(5), 22–36.

Feng, Y. (2021). Nanoparticles in plant science: Understanding transport and physiological effects. *Nanomaterials*, 11(1), 76. <https://doi.org/10.3390/nano11010076>

Fu, L., Wang, J., Wang, Y. (2023). *Advances in transport and toxicity of nanoparticles in plants*. *Journal of Nanobiotechnology*, 21, 75. <https://doi.org/10.1186/s12951-023-01830-5>

Guo, H., Liu, Y., Chen, J., Zhu, Y., & Zhang, Z. (2022). The effects of several metal nanoparticles on seed germination and seedling growth: A Meta-Analysis. *Coatings*, 12(2), 183. <https://doi.org/10.3390/coatings12020183>

Hussain, A. (2022). Carbon-based nanoparticles alleviate copper-induced stress in maize. *Environmental Research*, 204, 111972. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111972>

Iijima, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 354(6348), 56–58.

Imada, K., Sakai, S., Kajihara, H., Tanaka, S., e Ito, S. (2016). Las nanopartículas de óxido de magnesio inducen resistencia sistémica en tomate contra la enfermedad del marchitamiento bacteriano. *Plant Pathology*, 65(4), 551–560.

InfoAgro México. (s.f.). Uso de la nanotecnología para el mejoramiento de agricultura. <https://mexico.infoagro.com/uso-de-la-nanotecnologia-para-el-mejoramiento-de-agricultura/>

Juárez-Maldonado, A. (2016). Composición mineral y rendimiento de pimiento morrón en hidroponía con diferentes concentraciones de níquel. *Agrociencia*, 50(3), 385–395.

Kah, M., Beulke, S., Tiede, K., & Hofmann, T. (2018). Nanopesticides: State of knowledge, environmental fate, and exposure modeling. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 43(16), 1823–1867.

Kang, M., Liu, Y., Weng, Y., Wang, H., & Bai, X. (2023). A critical review on the toxicity regulation and ecological risks of zinc oxide nanoparticles to plants. *Environmental Science: Nano*, 10, 2351–2372. <https://doi.org/10.1039/D3EN00630A>

Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. (2020). Nanoparticles: Properties, applications, and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(7), 908–931.

Khurana, A., Saxena, I., Tomar, R. S., & Kumar, R. (2023). Selenium nanoparticles for sustainable agriculture: A comprehensive review. *Environmental*

*Nanotechnology, Monitoring & Management*, 20, 100850.  
<https://doi.org/10.1016/j.enmm.2023.100850>

Lapaz, A. de M., Melo Santos, L. F., Pereira Yoshida, C. H., Heinrichs, R., Campos, M., Reis, A. R. dos. (2019). *Physiological and toxic effects of selenium on seed germination of cowpea seedlings*. *Bragantia*, 78(4), 498-508. DOI 10.1590/1678-4499.20190114.

Mousa, S. A., Elgohary, A. M., & Hegab, M. Y. (2023). Impact of Biologically and Chemically Synthesized Zinc Oxide Nanoparticles on Seed Germination and Seedlings' Growth. *Horticulturae*, 9(11), 1201.  
<https://doi.org/10.3390/horticulturae9111201>

Maswada, H. F., Seleiman, M. F., & Al-Suhaibani, N. A. (2023). Nickel ferrite nanoparticles as a smart nano-fertilizer to improve yield and quality of peanut plants and their residual effect on soil properties. *Plants*, 12(4), 817.  
<https://doi.org/10.3390/plants12040817>.

Pacheco-Londoño, L. C., Méndez-Rojas, M. A., & Pérez-Álvarez, M. (2020). Nanotecnología y su aplicación en la agricultura. *Revista Colombiana de Química*, 49(1), 36–49.

Portal Frutícola. (2022). Nanobiotecnología: cómo el Tecnológico de Monterrey busca revolucionar la agricultura.  
<https://www.portalfruticola.com/noticias/2025/07/10/nanobiotecnologia/>

Rastogi, A. (2017). Impact of engineered nanoparticles on plant growth: A review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110, 2–12.

Rai, M. (2021). Nanoparticles in sustainable agricultural production: A review. *Biotechnology Advances*, 51, 107699.  
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107699>

Rastogi, A., Zivcak, M., Sytar, O., Kalaji, H. M., He, X., Mbarki, S., & Brestic, M. (2022). Impact of metal and metal oxide nanoparticles on plant: A critical review. *Frontiers in Chemistry*, 10, 827726. [lijim](https://doi.org/10.3389/fchem.2022.827726)

Rafique, M., Rashid, M. H., Khan, S. A., Farooq, M., Ahmad, I., & Iqbal, M. (2025). *Magnetic nanoparticles in agriculture: Unraveling the impact of nickel ferrite nanoparticles on peanut growth and seed nutritional quality*. *Plants*, 14(7), 1011.  
<https://doi.org/10.3390/plants14071011>

Rizwan, M., Ali, S., Adrees, M., Ziar Rehman, M., Arif, M. S., & Rinklebe, J. (2022). Selenium nanoparticles in plant protection and nutrition: A critical review. *Environmental Pollution*, 292, 118363. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118363>

Siddiqui, S. A., Blinov, A. V., Serov, A. V., Gvozdenko, A. A., Kravtsov, A. A., Nagdalian, A. A., Raffa, V. V., Maglakelidze, D. G., Blinova, A. A., & Kobina, A. V. (2021). *Effect of Selenium Nanoparticles on Germination of Hordeum vulgare Barley Seeds*. *Coatings*, 11(7), 862. <https://doi.org/10.3390/coatings11070862>

Salata, O. V. (2004). Applications of nanoparticles in biology and medicine. *Journal of Nanobiotechnology*, 2(1), 3.

Sekhon, B. S., & Kaur, A. (2022). Nanotechnology and its applications in agriculture: A review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(1), 231–244. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13922>

Shahalaei, M. (2024). A review of metallic nanoparticles: present issues and prospects focused on the preparation methods, characterization techniques, and their theragnostic applications. *Frontiers in Chemistry*, 12:1398979. <https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1398979>

Taniguchi, N. (1974). On the basic concept of 'nanotechnology'. Proceedings of the International Conference on Production Engineering, Tokyo, Japan.

Tang, Y., Ding, Y., Nadeem, M., Li, Y., Zhao, W., Guo, Z., Zhang, P., & Rui, Y. (2025). *Enhancing maize stress tolerance with nickel ferrite nanoparticles: A sustainable approach to combat abiotic stress*. *Environmental Science: Nano*, 12(2), 302-314. <https://doi.org/10.1039/D4EN00603H>

The Business Research Company. (2024). *Agricultural Nanotechnology Global Market Report 2024*. <https://www.thebusinessresearchcompany.com/market-insights/agricultural-nanotechnology-market-insights-2025>

Valuate Reports. (2023). *Nanotechnology in Agriculture Market Size to Grow USD 6743.3 Million by 2030 with a CAGR of 12.7%*. <https://reports.valuates.com/market-reports/QYRE-Auto-18O5779/global-nanotechnology-in-agriculture>

Zhou, H., Zhao, Y., Duan, C., Wang, X., & Yu, J. (2023). Role of selenium nanoparticles in enhancing salinity tolerance in tomato plants. *Agronomy*, 13(1), 91. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010091>

Zhu, L. (2022). Regulation of plant responses to abiotic stress by nanoparticles: Current knowledge and future prospects. *Frontiers in Plant Science*, 13, 857906. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.857906>

Zuverza-Mena, N., Martínez-Fernández, D., Du, W., Hernández-Viezcás, J. A., Bonilla-Bird, N., López-Moreno, M. L., Komárek, M., Peralta-Videa, J. R., & Gardea-Torresdey, J. L. (2016). Exposure of engineered nanomaterials to plants: Insights into the physiological and biochemical responses—A review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110, 236–264. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.05.037>