

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Concentración de Clorofilas en Planta de Acelga (*Beta vulgaris* L.) Cultivadas en Suelo Modificado con Compuestos de Zinc

Por:

CELSO ALEJANDRO ALVARADO MORENO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México

Mayo, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Concentración de Clorofilas en Planta de Acelga (*Beta vulgaris* L.) Cultivadas en Suelo Modificado con Compuestos de Zinc

Por:

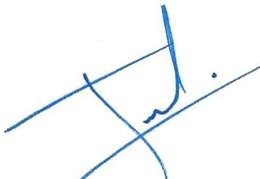
CELSO ALEJANDRO ALVARADO MORENO

TESIS

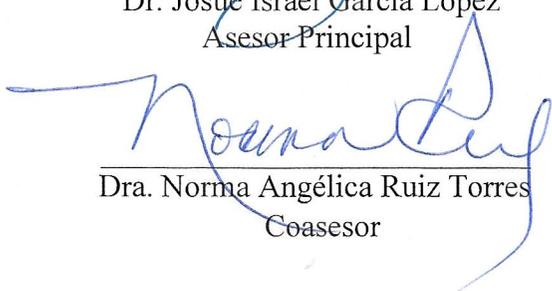
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

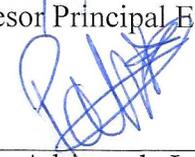
INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Aprobada por el Comité de Asesoría:


Dr. Josué Israel García López
Asesor Principal


Dra. Adriana Morfin Gutiérrez
Asesor Principal Externo


Dra. Norma Angélica Ruiz Torres
Coasesor


Dra. Patricia Adriana de León Martínez
Coasesor


Dr. Alberto Sandoval Rangel
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México
Mayo, 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 citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

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

Pasante



Celso Alejandro Alvarado Moreno

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la oportunidad de seguirme superando cada día, por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera ya que sin él no habría podido llegar hasta aquí, por protegerme y guiarme en cada paso que doy, por ser la fortaleza que me ha inspirado a seguir adelante cada día y ser el promotor para la superación personal, por estar conmigo en los momentos buenos y malos de mi vida, por nunca dejarme solo y mantenerme bien.

A mi Alma Terra Mater la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), por abrirme sus puertas y ayudarme avanzar en mi carrera profesional, por ser mi segundo hogar, por hacer de mí una persona preparada profesionalmente, agradezco por los momentos vividos, por las amistades adquiridas durante mi formación, por darme las herramientas para afrontar los desafíos que nos prepara la vida y a donde quiera que valla poner en alto tu nombre.

A mi padre Celso Alvarado, aunque el día de hoy ya no te encuentres conmigo te estoy eternamente agradecido por darme la dicha de estar vivo, por darme los valores para ser una persona de buenos principios, un abrazo hasta el cielo.

A mi madre Hilda Moreno por todo el apoyo que me has brindado, la confianza que depositaste en mí, el cariño y amor con el cual me tratas el cual me ha servido para echarle muchas ganas, por ser el principal motivo para ser una mejor persona cada día.

A mis hermanos por el inmenso apoyo, la confianza que depositaron en mí, por guiarme y hacer de mí una persona de bien, por apoyarme en los momentos difíciles y por darme el amor y cariño de cada uno de ustedes.

A mis maestros, por hacer de mí una persona preparada profesionalmente, por compartirme sus conocimientos, por todo el apoyo y consejos brindados, por motivarme a esforzarme cada día.

A mi asesor y profesor el Dr. Josué, por la orientación y ayuda brindada para poder realizar un logro más en mi vida, por darme la oportunidad de realizar el presente tema de tesis, por todo el apoyo y conocimiento brindado, gracias.

A mi asesora la Dra. Adriana Morfín por el apoyo inmenso, confianza brindada, por ayudarme a lograr una meta más en mi carrera profesional, de todo corazón gracias.

A mi profesora la Dra. Norma Ruiz por ser una gran persona de buen corazón, una persona admirable y querida por sus alumnos, por la confianza y apoyo brindado, por los consejos, enseñanzas y ejemplos a seguir que nos inculco, gracias.

A mi tutor Ing. Gándara por el apoyo brindado, por todas los consejos y el apoyo incondicional recibido, por ser una gran persona de mucho valor, gracias.

A mis amigos, por brindarme sus amistades, por los momentos vividos, por el apoyo brindado y hacer los momentos algo único.

Al Departamento de Fitomejoramiento, por ser la mejor carrera que siempre quise, por el apoyo recibido, por hacer posible un sueño, por todo el conocimiento adquirido y prepararnos para el mañana, eternamente agradecido.

DEDICATORIA

A mi mamá Hilda Moreno por tener la mejor mamá del mundo quien me ha brindado todo el apoyo con mucho amor y cariño, por tus enseñanzas y ejemplos, por tus sacrificios y esfuerzos que haces por mí cada día, por confiar en mí, de todo corazón te lo agradezco y con mucho orgullo hoy puedo decir lo logramos

A mis hermanos por el inmenso apoyo que depositaron en mí y hacer lograr este éxito y por qué siempre han estado hay cuando más los he necesitado, gracias.

A mi madrina Magdalena Alvarado, gracias por todo su apoyo incondicional y siempre creer en mí.

A todas mis amistades y amigos a las personas que de una u otra manera aportaron su granito de arena para hacer verdad esto, de todo corazón gracias.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIA.....	iii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO	iv
ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
RESUMEN	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Hipótesis	2
1.2 Objetivo general.....	2
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Generalidades de la acelga.....	3
2.1.1 Demanda de nutrientes	4
2.2 Generalidades de zinc	4
2.2.1 Importancia del zinc en el suelo.....	4
2.2.2 Importancia del zinc en la planta.....	5
2.2.3 Importancia del zinc en los humanos	5
2.2.4 Problemas por exceso y deficiencia de zinc.....	6
2.3 Fertilizantes convencionales	7
2.4 Nano-fertilizantes.....	7
2.4.1 Nanopartículas de óxido de zinc (NPsZnO).....	8
2.4.1.1 Síntesis de NPs-ZnO por coprecipitación química	9
2.4.1.2 Síntesis verde de NPs-ZnO	9
2.5 Impacto de los nanofertilizantes en los procesos fisiológicos de una planta.....	9
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
3.1 Material genético	11
3.2 Compuestos de Zn	11
3.3 Recolección de suelo	11
3.4 Condiciones de crecimiento de las plantas	11
3.5 Aplicación de tratamientos	12
3.6 Cosecha de las plantas	12

3.7 Concentración de clorofilas	12
3.8 Análisis estadístico	13
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	14
4.1 Contenido de clorofila a.....	14
4.2 Contenido de clorofila b.....	15
4.3 Contenido de clorofila total	16
4.4 Contenido de carotenoides totales	17
5. CONCLUSIONES.....	20
6. LITERATURA CITADA.....	21

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza para algunos parámetros agronómicos del cultivo de acelga cultivado en suelo modificado con compuestos de Zn.	14
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Contenido de clorofila a en plantas de acelga cultivadas en suelo modificado con ZnSO_4 y NPsZnO a concentraciones de 0, 100, 200 y 300 mg de Zn kg^{-1} de suelo. Los valores son el promedio de cinco repeticiones, medias ($n = 5$). Las barras representan la desviación estándar de la media. Letras diferentes en cada barra significan que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$). 15
- Figura 2. Contenido de clorofila b en plantas de acelga cultivadas en suelo modificado con ZnSO_4 y NPsZnO a concentraciones de 0, 100, 200 y 300 mg de Zn kg^{-1} de suelo. Los valores son el promedio de cinco repeticiones, medias ($n = 5$). Las barras representan la desviación estándar de la media. Letras diferentes en cada barra significan que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$). 16
- Figura 3. Contenido de clorofila total en plantas de acelga cultivadas en suelo modificado con ZnSO_4 y NPsZnO a concentraciones de 0, 100, 200 y 300 mg de Zn kg^{-1} de suelo. Los valores son el promedio de cinco repeticiones, medias ($n = 5$). Las barras representan la desviación estándar de la media. Letras diferentes en cada barra significan que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$). 17
- Figura 4. Contenido de carotenoides total en plantas de acelga cultivadas en suelo modificado con ZnSO_4 y NPsZnO a concentraciones de 0, 100, 200 y 300 mg de Zn kg^{-1} de suelo. Los valores son el promedio de cinco repeticiones, medias ($n = 5$). Las barras representan la desviación estándar de la media. Letras diferentes en cada barra significan que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$). 18

RESUMEN

La fertilización con zinc (Zn) determina en gran medida el rendimiento agronómico de los cultivos, ya que este elemento interviene en procesos fisiológicos que se llevan a cabo en las plantas como la síntesis de clorofilas, fotosíntesis y defensas contra factores de estrés abióticos, como sequías y enfermedades; por lo tanto, las deficiencias de este microelemento podrían reducir el rendimiento y valor nutricional de las cosechas. El objetivo de esta investigación fue determinar el impacto de nanopartículas cerámicas (NPsZnO) y una sal (ZnSO_4) como compuestos de Zn aplicados al suelo, para determinar su influencia en la concentración de pigmentos fotosintéticos (clorofila a, b y carotenoides) en plantas de acelga. Los resultados indican que los parámetros fisiológicos fueron modificados positivamente por ambos compuestos, cabe mencionar que la mayor concentración de clorofila a y b se presentó con ZnSO_4 a 300 mg de Zn/kg de suelo con incrementos del 19.72% y 8.5%, en comparación con las NPsZnO a una concentración homologa. Comúnmente, el ZnSO_4 se aplica como fertilizante para contrarrestar las deficiencias de Zn, esto debido a que presentan alta solubilidad lo que posiblemente influye sobre las respuestas fisiológicas del cultivo en estudio.

Palabras clave: nanomateriales, compuestos de Zn, clorofilas.

1. INTRODUCCIÓN

La deficiencia del zinc es un problema que afecta una tercera parte de la población mundial, causando un gran número de enfermedades, principalmente en los primeros años de vida. Este elemento juega un papel importante en diversos procesos metabólicos y biológicos de nuestro organismo y se encuentra presente en los huesos con una concentración del 90%. Debido a su importancia y sus funciones en el año de 1926 se declaró como un elemento esencial para las plantas y en 1934 como esencial para los mamíferos (Rosado, J., 1998; Nielsen, F.H., 2012).

Estos problemas de deficiencia en plantas y suelos son provocados por la baja concentración de nutrientes disponibles en los cultivos agrícolas. Los cuales son contrarrestados mediante la aplicación de fertilizantes agrícolas, que cubren las necesidades del suelo y de la planta mejorando las cantidades requeridas para la obtención de productos de mayor calidad y rendimiento. Aunque estas fertilizaciones convencionales se han utilizado durante muchos años y sus resultados son aceptables, presentan algunas desventajas como son; eficiencias menores al 30%, pérdidas de nutrientes por lixiviación y volatilización de compuestos, contaminación ambiental, impacto económico a productores, entre otros.

Recientemente, el sector agrícola ha utilizado a la nanotecnología como una herramienta para la creación y el diseño de nuevos nanomateriales, que puedan ser utilizados como fertilizantes alternativos, particularmente en forma de nanopartículas, ya que éstas cuentan con algunas características adecuadas, como son; tamaños nanométricos, alta área superficial y capacidad de disolución, que les permite ser absorbidas y asimiladas más fácilmente por una planta (González-Fuentes, J. A., *et al.* 2021; Vargas-Martínez, G., *et al.* 2023). Además, su tamaño les permite una mejor efectividad en la entrega de nutrientes, utilizando dosis más pequeñas, provocando un impacto positivo en los cultivos, el medio ambiente, la salud y la economía del productor.

De acuerdo con algunos investigadores las nanopartículas de óxido de zinc promueven el crecimiento y desarrollo de una planta, debido a que participan en procesos bioquímicos y

fisiológicos, como son; la fotosíntesis, la respiración, la síntesis de proteínas, formación de carbohidratos, formación de compuestos bioactivos (carotenoides y clorofila), entre otros. Específicamente, los cultivos tratados con nanopartículas de óxido de zinc, han presentado un incremento en la formación de pigmentos fotosintéticos (Fortis-Hernández, M., *et al.* 2024; Sánchez-Estrada, A., *et al.* 2024).

En esta tesis se realizó un estudio comparativo de tres diferentes fertilizantes; nanopartículas de óxido de zinc adquiridas de Sigma Aldrich, nanopartículas de óxidos de zinc obtenidas a partir de síntesis verde y sulfato de zinc convencional. Estos materiales fueron aplicados a un cultivo de acelga (*Beta vulgaris* L.) y posteriormente se evaluó su impacto en la concentración de carotenoides y clorofila, así como el rendimiento del cultivo.

1.1 Hipótesis

H₁: La adición de compuestos de Zn (NPsZnO y ZnSO₄) en suelo agrícola a concentraciones de 0, 100, 200 y 300 mg de Zn/kg de suelo estimulará la concentración de pigmentos fotosintéticos como son las clorofilas.

H₀: El suelo modificado con compuestos de Zn (NPsZnO y ZnSO₄) en un rango de concentraciones de 0, 100, 200 y 300 mg de Zn/kg de suelo no modificará la concentración de clorofilas en las plantas.

1.2 Objetivo general

Cuantificar la concentración de clorofilas en plantas de acelga cultivadas en suelo agrícola modificado con NPsZnO y ZnSO₄ a concentraciones de 0, 100, 200 y 300 mg de Zn/kg.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Generalidades de la acelga

La acelga (*Beta vulgaris* L.) es una planta bianual de hoja verde y tallo muy engrosado de color blanco o amarillo según la variedad, que pertenece a la familia chenopodiaceae. Es una planta muy apreciada por su aporte nutricional de vitamina A, vitamina C y ácido fólico. Además, es hipoenergética, rica en nutrientes, minerales (K, Mg, Na, Fe, I₂, Ca), fibra, contiene sustancias fitoquímicas y propiedades antioxidantes naturales. Generalmente los vegetales de hoja verde aportan carotenoides y clorofila a la dieta humana, siendo los primeros de ellos un tipo de pigmento que ayuda a la actividad provitamínica A, con propiedades antioxidantes y capacidad para la desactivación del oxígeno singlete (mutagénico, capaz de dañar el ADN e inactivar enzimas), mientras que la clorofila es otro tipo de pigmento fotosintético presente durante el proceso de fotosíntesis en la planta (Macías-De Costa, S., *et al.* 2003; Rosas-Villagómez, A., *et al.* 2018; Hidalgo, G., *et al.* 2018; Candia-Pacheco, L. R., *et al.* 2018).

El cultivo de acelga fue iniciado por los árabes en el año 600 a.C., posteriormente, los griegos la utilizaron como alimento y medicina debido a sus propiedades. Actualmente los mayores productores de acelga son América del norte y Europa central. Sin embargo, en México la acelga también es una planta muy producida con aproximadamente 12 mil toneladas al año (Romero-Valverde, A. M., 2019; Sánchez-Rosero, H. V., 2021; Rodríguez-De La Garza, J. A., *et al.* 2023).

Dentro de las ventajas de los cultivos de acelga, podemos considerar que es una planta que se puede cultivar todo el año, se adapta fácilmente a diferentes condiciones climáticas, las semillas y plantas germinan entre 10-30 °C en suelos profundos con materia orgánica y la duración de ciclo de la planta varía entre 50 y 70 días después de la fecha de siembra (Tropa, C. S., 2013).

2.1.1 Demanda de nutrientes

La nutrición es el proceso por el cual un ser vivo obtiene materia y energía para la formar estructuras y realizar sus funciones (Margulis, L., *et al.* 2008). La dinámica de nutrientes es fundamental para el metabolismo vegetal y determina en gran medida la productividad y respuestas a cambios ambientales (Escudero-Berián, A., *et al.* 2003). Nos referimos a la demanda de nutrientes, como aquella cantidad que requiere un cultivo para alcanzar su potencial productivo y rendimiento deseado, mientras que, disponibilidad de nutrientes, se refiere a la cantidad de nutrientes en el suelo que pueden ser absorbidos por las plantas (Pinochet, D., 2011).

El crecimiento saludable de una planta depende de varios factores como son; oxígeno (O₂), dióxido de carbono (CO₂), agua, nutrientes, luz, tiempo, riego, entre otros (Sierra, A., *et al.* 2007). La demanda de nutrientes es un aspecto crítico, que nos permite establecer programas de fertilización adecuados para cada cultivo (Sierra, B. C., 2002). La fertilización química es una de las técnicas más costosas y utilizadas para incrementar el rendimiento en cultivos agrícolas. Sin embargo, no es una técnica 100% efectiva y su uso inadecuado afecta a los ciclos de producción y los suelos (Baligar, V. C., *et al.* 2001). Por anterior, recientemente se ha recurrido al uso de nanofertilizantes basados óxido de zinc, debido a que tienen mayor eficiencia de fertilización utilizando menores dosis.

2.2 Generalidades de zinc

2.2.1 Importancia del zinc en el suelo

La fuente principal del zinc es proveniente de la meteorización química y física de una roca madre, este elemento llega al suelo a través de los procesos atmosféricos, tales como volcanes, incendios forestales y polvos superficiales, así como por procesos bióticos como son la descomposición, lixiviación, lavado superficial de las hijas, entre otros (Broadley, M. R., *et al.* 2007). Algunos de los factores que pueden afectar la cantidad y disponibilidad de zinc en el suelo pueden ser; el incremento de pH, un alto contenido de fósforo (disminuye la disponibilidad del zinc), bajos niveles de nitrógeno (limitan la absorción de zinc), el exceso

de humedad en los suelos y los altos niveles de arsénico (inhiben la absorción) (Rudani, k., *et al.* 2018). Es importante considerar que los niveles de zinc en suelos deben encontrarse en cantidades apropiadas para mantener una adecuada actividad de microorganismos, que tienen un papel clave en el flujo de energía y en el ciclo de la materia orgánica (Wyszkowska, J., *et al.* 2016).

2.2.2 Importancia del zinc en la planta

El zinc es un microelemento esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que participa en diversos procesos bioquímicos y fisiológicos de las mismas. En una planta el zinc actúa como regulador de proteínas, es un componente esencial de las enzimas, participa en la formación de clorofila, ayuda a la producción de auxinas (reguladores de crecimiento), es necesario para la producción de triptófano, un aminoácido esencial precursor del ácido Indol Butírico (hormona de crecimiento) (Das, S., *et al.* 2016). Por otra parte, el zinc participa en el proceso de conversión de los azúcares en almidón, a la formación de polen, activa la mayoría de enzimas para el metabolismo de carbohidratos, es el componente principal de los ribosomas, ayuda a la polinización (formación de los tubos polínicos), ayuda al mantenimiento de las membranas (Mousavi, S. R., *et al.* 2013). Además, el zinc es fundamental para promover la resistencia a los cultivos contra el estrés por sequía, se utiliza para promover la germinación de las semillas y es capaz de estimular las enzimas antioxidantes para contrarrestar la sequía (Umair-Hassan, M., *et al.* 2020). Por todo lo anterior, el zinc es de gran importancia para las plantas, por lo que una deficiencia del mismo, podría afectar el proceso de fotosíntesis y consecuentemente el rendimiento de un cultivo.

2.2.3 Importancia del zinc en los humanos

Actualmente la deficiencia de zinc en los alimentos es un problema a nivel mundial, el cual afecta particularmente a bebés, niños, adolescentes y mujeres embarazadas, debido a un mayor requerimiento en el consumo de este elemento (Roohani, N., *et al.* 2013). El zinc participa en la función catalítica de más de 100 enzimas presentes en el cuerpo humano. Es un oligoelemento que interviene en muchas funciones biológicas, siendo esencial para la

proliferación y diferenciación celular. La infancia es una de las etapas que requiere una nutrición adecuada, por lo que es importante una ingesta apropiada de zinc, ya que las deficiencias de este nutriente afectan el crecimiento y desarrollo en niños, y en casos severos puede provocar la muerte (López-De Romaña, D., *et al.* 2010; Rosas-Romero, R., *et al.* 2020). En los últimos años se ha estudiado la influencia del zinc en el funcionamiento y desarrollo del cerebro humano, ya que este elemento interacciona con una gran cantidad de estructuras cerebrales. Además de estar asociado a diversos problemas como el enanismo en adolescentes, hipogonadismo en los hombres, desorden en la piel (dermatitis postular), alopecia, mala cicatrización, deterioro de las funciones cognitivas, diarrea, presencia de frecuentes infecciones, infecciones en el tracto respiratorio, entre otros (Restrepo-Caro, C., *et al.* 2016).

2.2.4 Problemas por exceso y deficiencia de zinc

El zinc es un elemento muy esencial para plantas, animales y seres humanos, esto debido a que interviene en varios procesos fisiológicos y bioquímicos. Dependiendo de la especie, una planta requiere bajas concentraciones de zinc para estar en óptimas condiciones (15-20 mg/kg de tejido seco). Sin embargo, una carencia de este elemento disminuye notablemente el rendimiento y la calidad de frutos en un cultivo (Nriagu, J. O., 2007; Almendros-García, P., 2008). Por lo que, las deficiencias de zinc en las plantas y alimentos son un problema que nos afecta a todos (Amezcuca-Romero, J. C., *et al.* 2017).

El zinc es un microelemento que se encuentra en concentraciones limitadas en suelos, provocando problemas en las plantas, como son; disminución del tamaño de la hoja, acortamiento de los entrenudos, infertilidad de las espiguillas y clorosis intervenal en hojas nuevas, etc., que consecuentemente tiene un gran impacto en granos y frutos. Finalmente, el consumo de estos alimentos deficientes de zinc, genera problemas físicos y cognitivos desde los primeros años de vida (Restrepo-Caro, C., *et al.* 2016; Manríque-Ruiz, A. R., 2017). Aunque el zinc es un elemento comúnmente deficiente en la mayoría de suelos, el uso descontrolado de fertilizantes agrícolas, así como de plaguicidas ricos en zinc, pueden provocar un exceso del mismo, generando problemas de toxicidad en la planta, como

trastornos morfológicos, bioquímicos y fisiológicos. Además de problemas a la salud, como, dolor abdominal, náuseas, vómito y en algunos casos pancreatitis (Tsonev, T., *et al.* 2012; Martín-Navarro, L., *et al.* 2016; Balafrej, H., *et al.* 2020).

2.3 Fertilizantes convencionales

Inicialmente el crecimiento poblacional y la alta demanda de alimentos ha provocado cosechas con bajos rendimientos en un cultivo agrícola, originando el uso de estiércol y desechos de plantas para la recuperación del suelo. A partir de estas necesidades alimentarias, alrededor del siglo XIX surge la producción industrial de diversos fertilizantes, los cuales, serían utilizados como herramienta para la obtención de cultivos de mejor calidad y mayor rendimiento en la agricultura moderna (Grageda-Cabrera, O. A., *et al.* 2012). Los fertilizantes convencionales se han utilizado durante 50 años alrededor de todo el mundo, con la finalidad de mejorar el crecimiento y desarrollo de una planta en un cultivo, así como, de incrementar la producción y cubrir la demanda de alimentos (Upadhyay, P. K., *et al.* 2023).

Algunos de los fertilizantes convencionales mayormente utilizados en la agricultura son: la urea, el superfosfato tripe (TSP), fosfato dianómico (DAP), superfosfato simple (SSP), fosfato monoamónico (MAP) y el nitrógeno-fósforo-potasio (NPK) (Thavaseelan, D., *et al.* 2021). Una de las principales desventajas de los fertilizantes convencionales son la pérdida de minerales por lixiviación de nutrientes y las pérdidas por volatilización. Debido a lo anterior, surge la necesidad de utilizar fertilizantes alternativos que permitan fertilizaciones más efectivas con menores dosis.

2.4 Nano-fertilizantes

La producción de productos comestibles a mayor escala y en menores espacios de suelo, son uno de los principales retos con los que se enfrenta actualmente el sector agrícola, por lo que el uso de fertilizantes controlados es la mejor manera de incrementar el rendimiento y calidad de un cultivo. Por lo que, la nanotecnología ofrece una nueva visión de la agricultura

enfocada a la fertilización de cultivos, con mínimas pérdidas de nutrientes por lixiviación y volatilización.

Una alternativa es el uso de nanofertilizantes, que son comúnmente fertilizantes en forma de nanopartículas con un tamaño entre 1-100 nm. Estos nanofertilizantes presentan algunas ventajas, comparados con los fertilizantes convencionales como son; alta capacidad de sorción, área de superficie y liberación controlada de nutrientes a sitios específicos (Chaitra, P., *et al.* 2021), provocando un efecto positivo en el crecimiento de una planta (Mishra, S., *et al.* 2017; Sadati-Valojai, S. T., *et al.* 2021).

2.4.1 Nanopartículas de óxido de zinc (NPsZnO)

Recientemente, las NPsZnO han sido utilizadas como nanofertilizantes en diversos cultivos, debido a sus propiedades opto-eléctricas, físicas y antimicrobianas, que provocan efectos positivos en una planta, por ejemplo, el incremento en algunos compuestos fitoquímicos como flavonoides, fenoles, antioxidantes, además de favorecer los parámetros nutricionales y fisiológicos en la planta y sus partes comestibles, mejorando su calidad comercial y nutracéutica (Rivera-Gutiérrez, R. G., *et al.* 2021; Galindo-Guzmán, A. P., *et al.* 2022; Fortis-Hernández, M., *et al.* 2024).

De manera general, la síntesis de nanopartículas se lleva a cabo mediante dos rutas principales, a) **top-down**, que significa de **arriba hacia abajo** y consiste en la disminución del tamaño de partícula de un material a granel a partir de métodos físicos, siendo la molienda mecánica (reacción en estado sólido) la síntesis más utilizada. La segunda ruta es conocida como b) **bottom-up**, de **abajo hacia arriba** y se refiere a los métodos químicos para la síntesis de nanomateriales, como pueden ser los métodos de sol-gel, descomposición térmica, síntesis solvotermal, coprecipitación química, biosíntesis verde, entre otros. Aunque ambas rutas son utilizadas para la obtención de nanomateriales, es importante mencionar que cada método de síntesis, así como las condiciones del mismo, permite un control del tamaño y forma de las nanopartículas (Zanella, R., 2012; Abbasifar, A., *et al.* 2020).

2.4.1.1 Síntesis de NPs-ZnO por coprecipitación química

La coprecipitación química es uno de los métodos más utilizados para la síntesis de NPs-ZnO, que básicamente consiste en la precipitación simultánea de dos o más soluciones, con solubilidades similares. Es un método simple y barato que permite la obtención de una gran cantidad de nanopartículas con tamaño y forma deseada. Inicia con la formación de especies insolubles bajo condiciones de sobresaturación, seguido de la formación de partículas pequeñas, después ocurre la agregación de material e incrementan su tamaño y finalmente se induce a la precipitación de especies químicas con la adición de algún compuesto precipitante (Barrientos, J. E., *et al.* 2013; López-Mencía, A, 2018; Gaona-Bejarano, W. A., *et al.* 2023).

2.4.1.2 Síntesis verde de NPs-ZnO

Actualmente se ha incursionado en la síntesis verde para la obtención de NPs-ZnO, un método químico alternativo que tiene como objetivo, la obtención de soluciones nuevas que sustituyan a las sustancias químicas convencionales. Estas soluciones pueden ser obtenidas a partir de hojas, raíces, flores y microorganismos como bacterias, hongos algas, etc. Lo cual minimiza los costos, tiempo e impactos al medio ambiente, obteniendo nanopartículas limpias y eficientes a partir de reacciones químicas que generan un menor contenido de subproductos tóxicos en comparación con los métodos tradicionales (Alarcón-Hernández, C. de J., 2022; Hernández-Díaz, P., 2023).

2.5 Impacto de los nanofertilizantes en los procesos fisiológicos de una planta

El uso de nanomateriales como herramienta para la nanofertilización ha generado un impacto positivo en el crecimiento y desarrollo de una planta, tomando en cuenta que sus tamaños se encuentran en un rango entre 1-100 nm, estos nanofertilizantes son capaces de disolverse y absorberse más fácilmente a través de las hojas o raíces, además, de su capacidad para suministrar nutrientes de forma efectiva, dosificada y prolongada (Méndez-López, A., *et al.* 2024). De acuerdo con algunas investigaciones se ha reportado lo siguiente:

Méndez-Argüello, B. *et al.*, reportan un incremento en el tamaño de la planta, el contenido nutricional y la actividad enzimática, en diferentes cultivos fertilizados con nanopartículas de ZnO y CuO, además, mostraron un efecto positivo sobre la reactividad de fitohormonas como el ácido indolacético, encargado de promover la elongación celular y división, y consecuentemente, acelera el crecimiento de la planta. Por su parte Basurto-Cereceda, S., *et al.*, reportan que plantas tratadas con nanopartículas, muestran un mayor crecimiento y contenido de clorofila, además no presentar efectos de toxicidad en las plantas. Finalmente, Razauddin *et al.*, reportan que el uso de nanofertilizantes garantiza una planta robusta, con un incremento en la longitud de brotes y raíces, que presenta un sistema de radículas estable, un aumento en la biomasa vegetal (eficiente absorción de nutrientes), y mejora los procesos fotosintéticos, obteniéndose productos más grandes, con mejor textura, color y rendimiento, lo que indica frutos más saludables y nutritivos para los humanos (Méndez-Argüello, B., *et al.* 2016; Basurto-Cereceda, S., *et al.* 2021; Razauddin, *et al.* 2023).

Los nutrientes minerales cumplen con funciones esenciales y específicas en el metabolismo de las plantas, como componentes de las estructuras orgánicas, osmoreguladores y actividades de reacciones enzimáticas (Gómez-Vera, P. P., 2018). Por lo que, debe considerarse el uso de nanofertilizantes para mejorar la absorción de nutrientes. Desde hace décadas, se ha considerado a la nanotecnología como herramienta para la creación de nuevos fertilizantes que sean capaces de bioestimular el crecimiento, las características morfológicas y bioquímicas de una planta, favoreciendo al medio ambiente, el suelo y la salud alimentaria, además de reducir el impacto económico para productores y agricultores (Ávila-Quezada, G., *et al.* 2024).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Material genético

Las semillas utilizadas para siembra fueron semillas de acelga (Kristen Seed®). Esta variedad se considera de un follaje de color verde intenso y atractivo. Con un crecimiento vigoroso de la planta, alcanzando en promedio una altura de 50 cm. Con una capacidad de rebrote excelente y una amplia resistencia a enfermedades foliares.

3.2 Compuestos de Zn

Las nanopartículas cerámicas de óxido de Zn (NPs ZnO) y el sulfato de Zn ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) se compraron en Sigma-Aldrich (San Luis, Misuri, USA).

3.3 Recolección de suelo

El suelo utilizado fue recolectado en un campo experimental agrícola situado en Saltillo, Coahuila, México (coordenadas $25^\circ 21' 24''$ longitud oeste y $101^\circ 02' 05''$ latitud norte a 1762 msnm). Las propiedades físicas y químicas ya fueron reportadas por García-Reyes et al. (2024), quienes destacaron que el suelo es deficiente en el Zn extraíble con DTPA-TEA, considerándolo como deficiente para el crecimiento y desarrollo de las plantas en suelos calcáreos (0.11 mg kg^{-1}).

3.4 Condiciones de crecimiento de las plantas

El experimento se llevó a cabo durante el 2021 y 2022 en el invernadero del departamento de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (coordenadas $25^\circ 23' 12.7''$ longitud oeste y $101^\circ 00' 9.8''$ latitud norte a 1783 msnm). Para el estudio se utilizaron macetas de polietileno (con capacidad de 10 L, diámetro interno medio de 24.3 cm y altura de 24.5 cm) que contenían la tierra (diez kg por maceta) que fue recolectada en el campo experimental agrícola. El suelo de cada maceta se fertilizó con 100 de N kg^{-1} en forma de urea prilada (46-0-0), 55 mg kg^{-1} de P en forma de fosfato diamónico

DAP (18-46-0), y 110 mg de K kg⁻¹ con cloruro de potasio (0-0-60). Las temperaturas del invernadero oscilaron entre 6 y 28 °C, y la humedad relativa osciló entre 21 y 72%. Además, la luz diurna media fue de 13,74 ± 0,36 mol m⁻² día⁻¹.

3.5 Aplicación de tratamientos

Las aplicaciones de Zn al suelo se realizaron como polvo seco con las diferentes fuentes de Zn (NPs ZnO, ZnSO₄ y GNPs ZnO), a concentraciones de 0, 100, 200 y 300 mg de Zn/kg de suelo (cada tratamiento con cinco repeticiones). Para ello, la capa superior del suelo de cada maceta (10 cm de profundidad, tres kg de suelo) se mezcló manualmente con los fertilizantes de Zn, simulando la aplicación al voleo, esta mezcla se concentra en la capa superior del suelo antes del crecimiento del cultivo, considerado esto como una práctica común en la aplicación de agroquímicos al suelo (García-Gómez *et al.*, 2017). Al terminar la mezcla de los tratamientos, la humedad del suelo se mantuvo a capacidad de campo durante 48 h. Durante la primera mitad del ciclo del cultivo (primeros 15 días), cada día alterno las plantas se regaron con 90 mL de agua desionizada/kg de suelo, y 120 mL todos los días durante la segunda mitad (35 días).

3.6 Cosecha de las plantas

La cosecha se realizó el día 55 después de la siembra, para ello se retiraron del suelo la planta y el bulbo y se pesó (g), enseguida, se cuantificó el número de hojas y se determinó el área foliar (cm²) con un medidor de área LI-3100C (LICOR Biosciences, Lincoln, NE).

3.7 Concentración de clorofilas

La evaluación cuantitativa de clorofila-a (CHLa), clorofila-b (CHLb), clorofila total (CHLt) y carotenoides se llevó a cabo en cada uno de los muestreos (Macalacham y Zalik, 1963; Rajput y Patil, 2017). Para ello, se tomó 1 g de material de hojas frescas y se homogeneizó con 10 mL de acetona al 80%, enseguida el extracto se centrifugó a 5000 rpm durante 5 min. El sobrenadante se recuperó para ser analizado, y la absorbancia de la solución extraída se midió a 480, 510, 645 y 663 nm, a partir de estas lecturas, se determinaron las

concentraciones de pigmento de clorofilas y carotenoides utilizando la siguiente fórmula/ecuación:

$$\text{Chlorophyll} - a \text{ mg } g^{-1} \text{ FW} = \frac{12.7 (A_{663}) - 2.69 (A_{645}) \times V}{1000} \times W$$

$$\text{Chlorophyll} - b \text{ mg } g^{-1} \text{ FW} = \frac{22.9 (A_{645}) - 4.68 (A_{663}) \times V}{1000} \times W$$

$$\text{Total chlorophyll } \text{mg } g^{-1} \text{ FW} = \frac{20.2 (A_{645}) + 8.02 (A_{663}) \times V}{1000} \times W$$

$$\text{Carotenoid } \text{mg } g^{-1} \text{ FW} = \frac{7.6 (A_{480}) - 1.49 (A_{510}) \times V}{1000} \times W$$

Donde,

A = Absorbancia a longitudes de onda específicas

V = Volumen final de extracto de clorofila en acetona al 80%

W = Peso fresco de tejido extraído

3.8 Análisis estadístico

El cultivo se estableció utilizando un diseño completamente aleatorio (la unidad experimental consistió de una maceta de plástico que contenían dos plantas de acelga). Los resultados se informaron como media \pm desviación estándar, las diferencias estadísticamente significativas entre las muestras se analizaron con un ANOVA y las medias de los tratamientos se compararon con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) utilizando el paquete estadístico SPSS versión 21.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del ANOVA para los parámetros fisiológicos indican que la modificación del suelo con los compuestos de Zn, modificaron la acumulación de pigmentos fotosintéticos (Cuadro 1). En el apartado de comparación de medias se discutirán a detalle los resultados.

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza para algunos parámetros agronómicos del cultivo de acelga cultivado en suelo modificado con compuestos de Zn.

FV	GL	Ca (mg g ⁻¹ Pf)	Cb (mg g ⁻¹ Pf)	Ct (mg g ⁻¹ Pf)	Car (mg g ⁻¹ Pf)
Tratamientos	6	197.68**	28.29**	369.17**	94.21**
Error	28	6.53	2.07	10.06	5.05
CV%		6.94	6.47	5.37	9.11

*, **= Significativo al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad, respectivamente; FV= Fuentes de variación; GL= Grados de libertad; CV= Coeficiente de variación; Ca= Clorofila a; Cb= Clorofila b; Ct= Clorofila total; Car= Carotenoides.

4.1 Contenido de clorofila a

Los resultados indican que todos los compuestos de Zn incrementaron la concentración de clorofila a (Figura 1). La mayor concentración se obtuvo con el ZnSO₄, donde se observó que a medida que se incrementó la concentración resultó en una mayor acumulación de clorofila, ejemplo; a 300 mg de Zn kg⁻¹ de suelo con este compuesto se obtuvo un incremento del 44% en comparación con el testigo. Al hacer la comparación con las NPs ZnO a la misma concentración el incremento fue de 19.72%.

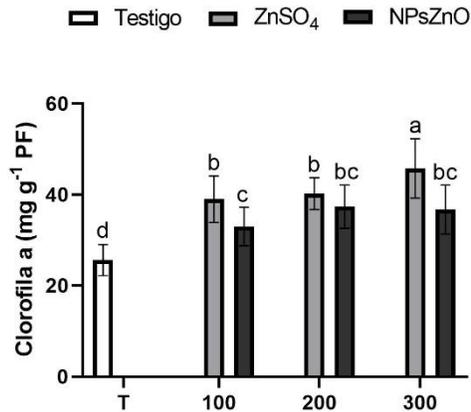


Figura 1. Contenido de clorofila a en plantas de acelga cultivadas en suelo modificado con ZnSO₄ y NPsZnO a concentraciones de 0, 100, 200 y 300 mg de Zn kg⁻¹ de suelo. Los valores son el promedio de cinco repeticiones, medias (n = 5). Las barras representan la desviación estándar de la media. Letras diferentes en cada barra significan que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, p ≤ 0.05).

4.2 Contenido de clorofila b

Para el contenido de clorofila b se observa una tendencia similar, ya que el ZnSO₄ fue el compuesto que presentó los mejores resultados. Específicamente, a 300 mg de Zn/Kg de suelo se logró un incremento del 28.2 y 8.5% en comparación con el testigo y NPsZnO a una concentración homologa (Figura 2).

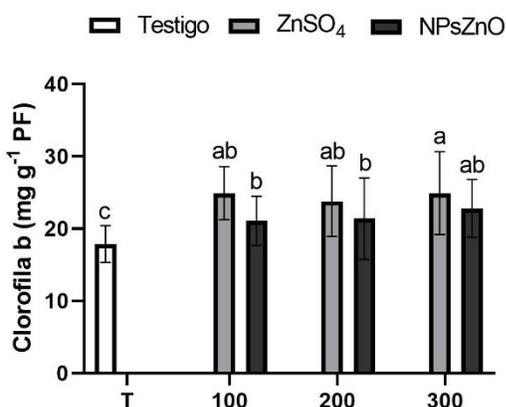


Figura 2. Contenido de clorofila b en plantas de acelga cultivadas en suelo modificado con ZnSO₄ y NPsZnO a concentraciones de 0, 100, 200 y 300 mg de Zn kg⁻¹ de suelo. Los valores son el promedio de cinco repeticiones, medias (n = 5). Las barras representan la desviación estándar de la media. Letras diferentes en cada barra significan que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, p ≤ 0.05).

4.3 Contenido de clorofila total

Por los resultados obtenidos en clorofila a y b, la clorofila total se incrementó en los tratamientos donde se aplicó Zn. Debido a que la sumatoria de la clorofila a y b dan como resultado la clorofila total, la mayor acumulación de este compuesto se presentó con ZnSO₄ a 300 mg de Zn/Kg de suelo.

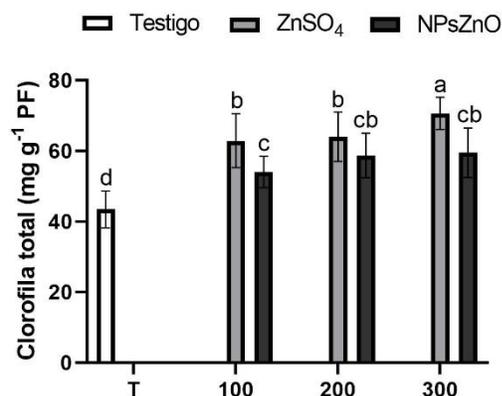


Figura 3. Contenido de clorofila total en plantas de acelga cultivadas en suelo modificado con $ZnSO_4$ y $NPsZnO$ a concentraciones de 0, 100, 200 y 300 mg de $Zn\ kg^{-1}$ de suelo. Los valores son el promedio de cinco repeticiones, medias ($n = 5$). Las barras representan la desviación estándar de la media. Letras diferentes en cada barra significan que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

4.4 Contenido de carotenoides totales

Para carotenoides se observa la misma tendencia, el mayor valor se obtuvo con el $ZnSO_4$ a la concentración más elevada (300 mg de Zn/Kg de suelo), lo que resultó en incrementos del 43.4 y 11.6 % en comparación con el testigo y $NPsZnO$ a la misma concentración.

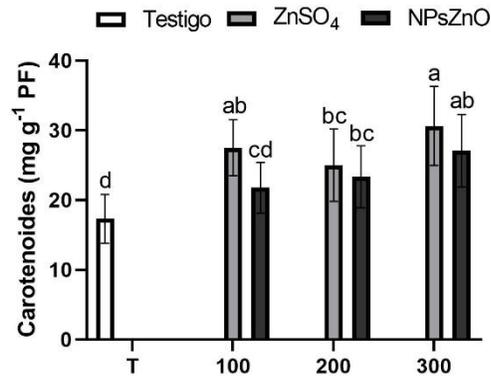


Figura 4. Contenido de carotenoides total en plantas de acelga cultivadas en suelo modificado con ZnSO₄ y NPsZnO a concentraciones de 0, 100, 200 y 300 mg de Zn kg⁻¹ de suelo. Los valores son el promedio de cinco repeticiones, medias (n = 5). Las barras representan la desviación estándar de la media. Letras diferentes en cada barra significan que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, p ≤ 0.05).

Los resultados permiten corroborar que todos los tratamientos con Zn permitieron el incremento de pigmentos fotosintéticos, ya que este microelemento esencial para el crecimiento de las plantas y es necesario para la biosíntesis de clorofila porque influye en la actividad de enzimas importantes como la anhidrasa carbónica que contiene un átomo de Zn que cataliza la hidratación del CO₂, facilitando la difusión del dióxido de carbono a los sitios de carboxilación en las plantas (Ruiz-Torres *et al.*, 2021). Según la literatura, las plantas requieren bajas concentraciones de Zn (15-20 mg/kg de tejido seco), lo cual está determinado por la especie. No obstante, las deficiencias de Zn pueden disminuir el rendimiento y la calidad del fruto (Jerome, 2007; P. Almendro, 2008).

Se ha documentado que la aplicación de nanofertilizantes a base de micronutrientes ha mejorado el potencial productivo de cultivos, con incrementos en la longitud de brotes y raíces, desarrollo del sistema radicular, aumento en la biomasa vegetal (eficiente absorción de nutrientes), y mejora los procesos fotosintéticos, obteniéndose mayores rendimientos, con mejor textura, color y frutos más saludables y nutritivos para los humanos (Sofía, 2021; Razauddin, 2023). Las mejoras en el crecimiento de las plantas por la aplicación de nanofertilizantes, se pueden atribuir un efecto positivo sobre la reactividad de fitohormonas

como el ácido indolacético, encargado de promover la elongación celular y división, y consecuentemente, acelera el crecimiento de la planta (Bulmaro *et al.*, 2016).

5. CONCLUSIONES

Todos los tratamientos de Zn permitieron mejorar la concentración de pigmentos fotosintéticos en las plantas. Los mayores incrementos se presentaron con ZnSO_4 a 300 mg de Zn/Kg de suelo. En el caso de las NPsZnO , también presentaron incrementos significativos con respecto al testigo, pero menores en comparación con el fertilizante convencional (ZnSO_4).

6. LITERATURA CITADA

- Abbasifar, A., Shahrabadi, F., and ValizadehKaji, B. 2020. Effects of green synthesized zinc and copper nano-fertilizers on the morphological and biochemical attributes of basil plant. *Journal of Plant Nutrition*, 43(8), 1104-1118.
- Alarcón Hernández, C. de J. 2022. Análisis de la síntesis química y verde de nanopartículas de óxidos metálicos: ventajas y desventajas. Tesis de maestría. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.
- Almendros-García, P., Rico-Selas, M. I., López-Valdivia, L. M., y Álvarez-Álvarez, J. M. 2008. Deficiencia de zinc en los cultivos y correctores de carencia del micronutriente. *Vida rural*, 19(280), 12-16.
- Amezcu-Romero, J. C., y Lara-Flores, M. 2017. El zinc en las plantas. *Ciencia*, 68(3), 28-35.
- Ávila-Quezada, G., y Álvarez-Álvarez, C. A. 2024. Nanofertilizantes en la agricultura: una visión hacia el futuro alimentario. *Revista Digital Universitaria*, 25(3). 1-5.
- Balafrej, H., Bogusz, D., Triqui, Z. E. A., Guedira, A., Bendaou, N., Smouni, A., and Fahr, M. 2020. Zinc hyperaccumulation in plants: A review. *Plants*, 9(5), 562.
- Baligar, V. C., Fageria, N. K., and He, Z. L. 2001. Nutrient use efficiency in plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32(7-8), 921-950.
- Barrientos, J. E., y Matutes, A. J. 2013. Uso de nanomateriales magnéticos para la remoción de arsénico del agua para consumo humano. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 6(11), 76-84.
- Basurto-Cereceda, S., López-Lima, D., Martínez-Enríquez, A. I., y Pariona-Mendoza, N. 2021. Nanotecnología al rescate de la agricultura: nanofungicidas y nanofertilizantes. *Biotechnología en Movimiento*, 13(25), 13-22
- Broadley, M. R., White, P. J., Hammond, J. P., Zelko, I., and Lux, A. 2007. Zinc in plants. *New phytologist*, 173(4), 677-702.

- Candia-Pacheco, L. R., y Quiroga-Sossa, M. 2018. Producción de acelga (*Beta vulgaris*) en sistema vertical a diferentes distancias en ambiente protegido. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 5(2), 101–116.
- Chaitra, A. K. P., Ahuja, R., Sidhu, S. P. K., and Sikka, R. 2021. Importance of nano fertilizers in sustainable agriculture. *Environmental Science & Ecology: Current Research*, 5, 1029.
- Das, S., and Green, A. 2016. Zinc in crops and human health. *Biofortification of food crops*, 31-40.
- Escudero-Berián, A., y Mediavilla-Gregorio, S. 2003. Dinámica interna de los nutrientes. *Ecosistemas*, 12(1).
- Fortis-Hernández, M., Pivaral-Chávez, A. G., Galindo-Guzmán, A. P., Preciado-Rangel, P., Ruiz-Ortega, F. J., y Trejo-Valencia, R. 2024. Nanopartículas de óxido de zinc para incrementar rendimiento, compuestos bioactivos y actividad enzimática en lechuga. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 11(1), 1-13.
- Galindo-Guzmán, A. P., Fortis-Hernández, M., De La Rosa-Reta, C. V., Zermeño-González, H., y Galindo-Guzmán, M. 2022. Síntesis química de nanopartículas de óxido de zinc y su evaluación en plántulas de *Lactuca sativa*. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 13(28), 299-308.
- Gaona-Bejarano, W. A., Machaca-Estofanero, C. J., Salas-Suaquita, C., Gallegos-Yañez, G. J., y Gamarra-Hurtado, B. Y. 2023. Método de precipitación y coprecipitación. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Gómez Vera, P. P. 2018. Efecto de la aplicación foliar de nanofertilizantes sobre la capacidad fotosintética de dos clones de cacao (*Theobroma cacao L.*). Tesis de maestría, Universidad Central de Venezuela.
- González-Fuentes, J. A., Lozano-Cavazos, C. J., Preciado-Rangel, P., Troyo-Diéguez, E., Rojas-Duarte, A., y Rodríguez-Ortiz, J. C. 2021. Fertilización orgánica contra convencional en el rendimiento, atributos morfológicos y calidad de fruto de tomate uva en un sistema de subirrigación no recirculante. *Terra Latinoamericana*, 39, 1-16.

- Grageda-Cabrera, O. A., Díaz-Franco, A., Peña-Cabriales, J. J., y Vera-Nuñez, J. A. 2012. Impacto de los biofertilizantes en la agricultura. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(6), 1261-1274.
- Hernández Díaz, P. 2023. Síntesis verde de nanopartículas con propiedades antimicrobianas. Tecnológico Nacional de México.
- Hidalgo, G., Heredia, S., y Yanez, P. 2018. Estudio de aceptabilidad de acelgas rojas y amarillas (*Beta vulgaris* variedad cicla) en preparaciones de autor en Ecuador. *Espíritu Emprendedor TES*, 2(1), 53-66.
- López-De Romaña, D., Castillo, C., y Diazgranados, D. 2010. El zinc en la salud humana-1. *Revista chilena de nutrición*, 37(2), 234-239.
- López-Mencia, A. 2018. Síntesis y funcionalización de nanopartículas magnéticas. Tesis de maestría. Universidad de Oviedo.
- Macías-De Costa, S., Montenegro, M. A., Arregui, T., Sánchez-De Pinto, M. I., Nazareno, M. A., y López-De Mishima, B. 2003. Caracterización de acelga fresca de Santiago del Estero (Argentina). Comparación del contenido de nutrientes en hoja y tallo. Evaluación de los carotenoides presentes. *Ciência y Tecnologia de Alimentos*, 23(1), 33-37.
- Manríque-Ruiz, A. R. 2017. Desarrollo de un modelo de estimación de dosis de zinc en el cultivo de maíz (*Zea mays L.*). Tesis de maestría, Universidad de Chile.
- Margulis, L., y Sagan, D. 2008. El proceso de nutrición en las plantas. *Fundamentos de fisiología vegetal*, 242-258.
- Martín-Navarro, L., Falcón-Roca, R., Hernández-García, M., Reyes-Suárez, P., Jiménez-Cabrera, I., Martínez-Martínez, D., ... y González-Reimers, E. 2016. Intoxicación por zinc. *Majorensis*, 12, 36-40.
- Méndez-Argüello, B. M., Lira-Saldivar, R. H., y Vera-Reyes, I. 2016. Respuestas fisiológicas de plantas cultivadas en bioespacios por efecto de nanofertilizantes y zeolita. *Agronano Tecnología*, México, Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA). 13, 62-79.

- Méndez-López, A., García-Santiago, J. C., González-Méndez, L. M., Martínez-Amador, S. Y., Leal-Robles, A. I., y Sánchez-Vega, M. 2024. Impacto de nanofertilizantes en el rendimiento y calidad de pepino bajo condiciones de invernadero. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 15(4), 1-12.
- Mishra, S., Keswani, C., Abhilash, P. C., Fraceto, L. F., and Singh, H. B. 2017. Integrated approach of agri-nanotechnology: challenges and future trends. *Frontiers in Plant Science*, 8, 471.
- Mousavi, S. R., Galavi, M., and Rezaei, M. 2013. Zinc (Zn) Importance for Crop Production. A Review. *International Journal of Agronomy and Plant Production*, 4(1), 64-68
- Nielsen, F. H. 2012. History of zinc in agriculture. *Advances in Nutrition*, 3(6), 783-789.
- Nriagu, J. O. 2007. Zinc toxicity in humans. School of public health, University of Michigan, 1-7.
- Pinochet, T. D., 2011. Guía para la fertilización de cultivos brassicas forrajeras. Coyhaique: Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias, 228, 33-49.
- Razauddin, Ninama, J., Sachan, K., Sulochna, Yadav, B., Satapathy, S. N., Kumar, J., and Singh, B. V. 2023. Effects and Consequences of Nano Fertilizer Application on Plant Growth and Developments: A Review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(10), 2288-2298.
- Restrepo-Caro, C., Coronell, M. D. C., Arrollo, J., Martínez, G., Sánchez-Majana, L., y Sarmiento-Rubiano, L. A. 2016. La deficiencia de zinc: un problema global que afecta la salud y el desarrollo cognitivo. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 66(3), 165-175.
- Rivera-Gutiérrez, R. G., Preciado-Rangel, P., Fortis-Hernández, M., Betancourt-Galindo, R., Yescas-Coronado, P., y Orozco-Vidal, J. A. 2021. Nanopartículas de óxido de zinc y su efecto en el rendimiento y calidad de melón. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(5), 791-803.
- Rodríguez-De La Garza, J. A., Guerra-Guerra, C. N., Trejo-Téllez, L. I., Alvarado-Camarillo, D., González-Méndez, L. M., Méndez-López, A., and Martínez-Amador, S. Y. 2023.

- Application of compost tea, co-inoculation and inorganic fertilization on Swiss chard plants. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-13.
- Romero-Valverde, A. M. 2019. Efecto de cuatro dosis del bioestimulante biol, como complemento a la fertilización mineral, en la producción de acelga *Beta vulgaris var. Cicla L.(Chenopodiaceae)*. Universidad Privada Antenor Orrego
- Roohani, N., Hurrell, R., Kelishadi, R., and Schulin, R. 2013. Zinc and its importance for human health: An integrative review. *Journal of research in medical sciences: the official journal of Isfahan University of Medical Sciences*, 18(2), 144-157.
- Rosado, J. L. 1998. Deficiencia de zinc y sus implicaciones funcionales. *Salud pública de México*, 40 (2), 181-189.
- Rosas-Romero, R., y Covarrubias-Gómez, A. 2020. El papel del zinc en la salud humana. *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, 58(4), 477-485.
- Rosas-Villagómez, A., Medina-Saavedra, T., y Arroyo-Figueroa, G. 2018. Medición del área foliar de la producción de acelgas (*Beta vulgaris var. cycla*) mediante el uso de microorganismos de montaña y *Azospirillum brasilensis*. *Jóvenes en la ciencia*, 4(1), 1-5.
- Rudani, K., Vishal, P., and Kalavati, P. 2018. The importance of zinc in plant growth-A review. *Int. Res. J. Nat. Appl. Sci*, 5(2), 38-48.
- Sadati Valojai, S. T., Niknejad, Y., Fallah Amoli, H., and Barari Tari, D. 2021. Response of rice yield and quality to nano-fertilizers in comparison with conventional fertilizers. *Journal of Plant Nutrition*, 44(13), 1971-1981.
- Sánchez-Estrada, A., Fortis-Hernández, M., Hernández-Cruz, D., Lagunes-Fortiz., E., Betancourt-Galindo, R., y Fortiz-Hernández, J. 2024. La biofortificación con nanopartículas de óxido de zinc vía foliar aumenta la acumulación de biomasa y calidad fitoquímica de la lechuga. *Informacion Tecnica Economica Agraria*, 120(4), 344-359.
- Sánchez-Rosero, H. V. 2021. Efecto de tres variedades de acelga y un manejo etológico para la prevención de insectos plagas. Tesis de grado. Universidad Agraria del Ecuador.

- Sierra, A., Simonne, E., y Treadwell, D. 2007. Principios y prácticas para el manejo de nutrientes en la producción de Hortalizas. Horticultural Sciences Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, (17) 1-20.
- Sierra B., C. 2002. Demanda de nitrógeno, fósforo y potasio en vides de mesa. Norte Chico. Tierra Adentro. 46, 10-11
- Thavaseelan, D., and Priyadarshana, G. 2021. Nanofertilizer use for sustainable agriculture. Journal of Research Technology and Engineering, 2(1), 41-59.
- Tropa C., S. 2013. Nudo hortícola Los Ríos: Ficha técnica acelga. Informativo INIA, (120).
- Tsonev, T., and Cebola-Lidon, F. J. 2012. Zinc in plants-an overview. Emirates Journal of Food & Agriculture (EJFA), 24(4), 322-333.
- Umair-Hassan, M., Aamer, M., Umer Chattha, M., Haiying, T., Shahzad, B., Barbanti, L., and Guoqin, H. 2020. The critical role of zinc in plants facing the drought stress. Agriculture, 10(9), 396.
- Upadhyay, P. K., Dey, A., Singh, V. K., Dwivedi, B. S., Singh, T., Ga, R., and Shukla, G. 2023. Conjoint application of nano-urea with conventional fertilizers: An energy efficient and environmentally robust approach for sustainable crop production. Plos one, 18(7), 1-21
- Vargas-Martínez, G., Betancourt-Galindo, R., Juárez-Maldonado, A., Sánchez-Vega, M., Sandoval-Rangel, A., and Méndez López, A. 2023. Impact of NPsZnO and rhizospheric microorganisms on tomato growth and biomass. Tropical and Subtropical Agroecosystems, 26 (010) 1-12.
- Wyszkowska, J., Boros-Lajszner, E., Borowik, A., Baćmaga, M., Kucharski, J., and Tomkiel, M. 2016. Implication of zinc excess on soil health. Journal of Environmental Science and Health, Part B, 51(5), 261-270.
- Zanella, R. 2012. Metodologías para la síntesis de nanopartículas: controlando forma y tamaño. Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología, 5(1), 69-81.