UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
PROGRAMA DOCENTE DE LA CARRERA DE
INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Imbibición de semillas de girasol (Helianthus annuus L.) con nanopartículas de oxido de zinc (GNPs ZnO).

Por:

ALBANIA REYES LAGUNES

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México
Agosto 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
PROGRAMA DOCENTE DE LA CARRERA DE
INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Imbibición de semillas de girasol (Helianthus annuus L.) con nanopartículas de oxido de zinc (GNPs ZnO).

Por:

ALBANIA REYES LAGUNES

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Aprobada por el Comité Asesor:

DR. JOSUE ISRAEL GARCIA LOPEZ
Asesor Principal

DRA. ADRIANA MORFÍN GUTIÉRREZ
Asesor Principal Externo

DRA. NORMA ANGELICA RUIZ TORRES
Coasesor

DRA. PATRICIA ADRIANA DE LEON MARTINEZ
Coasesor

DR ALBERTO SANDOVAL RANGEL
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México
Agosto 2026

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, 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



Albania Reyes Lagunes

AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecer a Dios, por acompañarme en este camino, por darme la fuerza en aquellos momentos de dificultad y ayudarme a superar cada desafío.

A mi Alma Mater, la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por abrirme las puertas y proporcionarme los recursos necesarios durante mi formación académica, por permitirme dar un paso más hacia adelante.

A mi asesor, el Dr. Josué Israel García López, por darme la oportunidad de trabajar con él, por su tiempo, su compromiso y por sus conocimientos compartidos durante el desarrollo de este proyecto.

A la Dra. Adriana Morfín Gutiérrez, por su constante apoyo, por compartir generosamente sus conocimientos conmigo, por su paciencia y por su tiempo.

Agradezco a la Técnico Académico QFB. Rubi Aglai Martínez Alvarado por su apoyo en el laboratorio para el desarrollo de esta Tesis

A mis amigos de la universidad: Valentina Álvarez, Angélica Aparicio, Stephanie León, Karen García, Liliana Hernández, Luis Neri, Jazmín Martínez, Jesús Zamora y Aldo Pedraza gracias por su amistad, por todos los momentos que pasamos juntos, de alegrías y tristezas, por las risas, e incluso las regañadas que nos dimos unos a otros, por hacer que esta etapa fuera inolvidable y que a pesar de que cada uno tomó caminos diferentes, su amistad permanecerá siempre conmigo, gracias.

DEDICATORIAS

En memoria de mi padre **Alejandro Reyes†**, quien ya no está conmigo, quiero agradecerle por haberme dado su apoyo durante mi primer año de carrera, quien siempre confió en mí, incluso cuando yo lo dudaba.

Gracias por haberme dado tus consejos y tu amor, porque a pesar de los obstáculos que se nos presentaron, lograste mantenerme siempre firme de tu mano para no rendirme. Tus enseñanzas y tu fuerza siempre fueron para mí, una de mis guías para finalizar esta etapa.

Aunque te fuiste sin verme cumplir esta meta, siempre te llevo conmigo en cada uno de mis triunfos. Te amo infinitamente.

A mi madre, **Nancy Lagunes**, por ser mi mayor fortaleza, por ser mi lugar seguro en medio de tantos tropiezos y adversidades, por no soltarme de tu mano cuando sentía que no podía.

Gracias por cada sacrificio que has hecho por mí para lograr salir adelante durante todo este tiempo. Te agradezco también por haber cuidado de mi hijo cuando yo tenía que irme fuera de casa para cumplir con mi sueño universitario. Mil gracias por todas tus llamadas de atención, porque rendirme no era opción para ti, tenía que finalizar lo empezado para un mejor futuro de mi hijo, gracias, madre sin tu apoyo sé que esto no hubiera sido posible, este logro también es tuyo.

A mi hijo **Alexander**, gracias por haber confiado en mí, eres mi principal motivación, por ti no puedo rendirme, aunque el sacrificio ha sido muy difícil para los dos. Estar lejos de ti, siempre es la parte más dolorosa, en cada segundo, sé que con mi ausencia me perdí de momentos contigo, de verte crecer, pero sé que siempre al final del día, tenías un abrazo y una sonrisa para mamá al llegar de vacaciones a casa y vernos de nuevo, gracias, hijo por tu tiempo y paciencia, este logro también es tuyo.

A mis hermanas, por haber confiado en mí y haberme brindado su apoyo incondicional. Gracias por haber sido parte de este sueño.

A mi tía **Enedelia Reyes**, por haber estado conmigo en una de las etapas más duras de mi vida, tras la ausencia de mi padre, por ser mi apoyo, y no haberme dejado sola a lo largo de mi carrera.

A mi familia, especialmente a mis abuelitas, por su cariño y por motivarme a seguir adelante.

*Con cariño, **Albania***

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS ii
DEDICATORIAS 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 2
2. REVISIÓN DE LITERATURA 3
2.1 Importancia de las semillas de girasol 3
2.1.2. Valor nutricional 4
2.1.3. Proceso de germinación del girasol 4
2.1.4. Problemáticas en las semillas de girasol 5
2.2. Importancia de Zn en las plantas 5
2.2.1 Nanopartículas de óxido de zinc (NPs ZnO) 6
2.1.2 Síntesis verde de nanopartículas de ZnO (GNPs ZnO) 7
3. MATERIALES Y MÉTODOS 9
3.1 Material genético 9
3.2 Determinación de la tasa de imbibición para cada especie evaluada 9
3.3 Fenoles totales 10
3.4 Propiedades antioxidantes (ABTS) 10
3.5 Diseño experimental y análisis estadístico 11
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 12
4.1 ANVAS de germinación 12
4.2 Calidad fisiológica de la semilla 12
4.3 ANVAS de metabolitos secundarios y capacidad antioxidante 14
4.4 Fenoles totales y ABTS 14
5. CONCLUSIONES 16

6. LITERATURA CITADA 17

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. ANVAS de germinación y plántulas anormales por la aplicación de tratamientos con Zn durante la imbibición de semillas. 12

Cuadro 2. ANVAS de fenoles totales y capacidad antioxidante por la aplicación de tratamientos con Zn durante la imbibición de semillas. 14

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Porcentaje de germinación (A), plántulas anormales (B) y semillas sin germinar (C) en semilla de girasol por la aplicación de NPs ZnO (0-20 ppm). Las letras diferentes en cada barra indican que los tratamientos difirieron de forma significativa (Tukey, $p \leq 0,05$)..... 13

Figura 2. Fenoles totales (A) y propiedades antioxidantes DPPH (B) en brotes de semillas de girasol expuestas a tratamientos con NPs ZnO (0-20 ppm). Las letras diferentes en cada barra indican que los tratamientos difirieron de forma significativa (Tukey, $p \leq 0,05$). 15

RESUMEN

Durante el acondicionamiento de semillas previo a la siembra, se están aplicando nanomateriales de diversos micronutrientes con el fin de mejorar la germinación y la síntesis de metabolitos secundarios deseables en la planta. En el presente estudio se determinó el impacto de nanopartículas de óxido de zinc, obtenidas mediante síntesis verde (GNPs ZnO) en concentraciones de 0, 5, 10 y 20 ppm sobre la germinación, el contenido de fenoles totales y la capacidad antioxidante de los polifenoles extraídos de semilla de girasol. Los resultados indican que la germinación mejoró significativamente en todos los tratamientos con GNPs ZnO, lo que redujo considerablemente el número de plántulas anormales. Para la concentración de fenoles totales, en los tratamientos con GNPs ZnO se presentaron incrementos promedio del 23%, en comparación con el control (0 ppm). Los incrementos de fenoles totales se reflejaron en un incremento promedio del 32.1% en los tratamientos con GNPs ZnO.

Palabras clave: semillas de girasol, pretratamiento con nanopartículas de ZnO, germinación, contenido total de compuestos fenólicos, capacidad antioxidante.

1. INTRODUCCIÓN

El girasol (*Helianthus annuus* L.) es una planta importante para el sector agrícola, ya que sus semillas presentan una gran diversidad de usos, como fuente de aceite, proteínas, fibra, vitaminas y minerales. Recientemente, se ha incrementado el consumo de semillas en las dietas alimentarias y las semillas de girasol no han sido la excepción, incorporándolas en la elaboración de alimentos dulces y salados, harinas, guarniciones, entre otros. Aunque es un alimento de valor nutricional, su crecimiento, desarrollo y productividad suelen verse afectados por la disponibilidad de micronutrientes esenciales, particularmente el Zn.

Los problemas ocasionados por las deficiencias de Zn son relevantes para la producción agrícola, pues afectan los procesos de germinación, crecimiento y desarrollo de las plantas, así como su respuesta al estrés biótico y abiótico. Aunque el uso de fertilizantes convencionales sigue siendo el más utilizado para satisfacer estas demandas de micronutrientes, su impacto en el medio ambiente sigue siendo una desventaja. En este contexto, el uso de fertilizaciones alternativas mediante nanomateriales ha adquirido gran importancia, especialmente las nanopartículas de óxido de zinc (NPs ZnO), debido a sus propiedades fisicoquímicas, que favorecen su absorción por las plantas.

Por otra parte, sintetizar NPs ZnO a partir de métodos verdes es una alternativa frente a métodos de síntesis convencionales para la obtención de nanomateriales, es decir, el aprovechamiento de extractos vegetales, así como sus compuestos fotoquímicos como agentes reductores de precursores metálicos, es una opción prometedora y amigable con el medio ambiente, ya que ofrece la posibilidad de obtener nanopartículas con características específicas empleando precursores menos tóxicos. Derivado de lo anterior, en esta tesis se realizó un estudio de imbibición de semillas de girasol con GNPs ZnO obtenidas a partir de un extracto de moringa como una estrategia de biofortificación y mejoramiento de procesos de germinación y desarrollo de plantas.

1.1 Hipótesis

H_1: El pretratamiento en semillas de girasol con GNPs ZnO en bajas concentraciones (0, 5, 10, 15 y 20 ppm), mejora las respuestas de la germinación, la acumulación de polifenoles y capacidad antioxidante en el tejido vegetal de los germinados.

H_0: El pretratamiento en semillas de girasol con GNPs ZnO en bajas concentraciones (0, 5, 10, 15 y 20 ppm), no genera modificaciones en germinación, la acumulación de polifenoles y capacidad antioxidante en el tejido vegetal.

1.2 Objetivo

Evaluar los efectos del pretratamiento con GNPs ZnO en bajas concentraciones (0, 5, 10, 15 y 20 ppm) sobre la germinación de semillas de girasol, la acumulación de polifenoles y capacidad antioxidante en el tejido vegetal de los germinados.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Importancia de las semillas de girasol

El girasol (*Helianthus annuus* L.) es una especie vegetal originaria del continente americano, pero su domesticación ocurrió por primera vez en México, evidenciando su cultivo en zonas del Valle de México desde hace aproximadamente 4.000 años. Esta planta es una oleaginosa de importancia mundial debido al alto porcentaje de aceite presente en sus semillas (aproximadamente 45 %). *Helianthus annuus* L., es una planta anual de la familia Asteraceae, la cual se adapta a la mayoría de los climas, favoreciendo su expansión a nivel mundial. En México se produce en los estados de Baja California, Durango, Jalisco, Nayarit, Sonora y Tamaulipas, con una superficie de 120 hectáreas y una producción total de 70 toneladas (Aguilar-García *et al.* 2005).

El girasol presenta dos momentos fenológicos importantes: el primero, que abarca desde la emergencia hasta la floración, y el segundo, que abarca desde la floración hasta la madurez; en otras palabras, el primero corresponde a la etapa vegetativa, mientras que el segundo corresponde a la etapa reproductiva. En la etapa vegetativa aparecen los cotiledones en el suelo, se forman las primeras hojas y el sistema de raíces crece, mientras que la etapa reproductiva inicia con la floración de la planta, después del desarrollo de nuevas hojas, crecimiento y maduración de las semillas (Baca Villagomez, 2025).

En cuanto a su morfología, es una planta herbácea, generalmente de tallo erecto (algunas variedades pueden presentar ramificaciones), que suele tener un solo tallo que termina en una inflorescencia grande y conspicua. Su sistema radical está formado por una raíz primaria y raíces secundarias que le permiten obtener agua y nutrientes del suelo. Las hojas suelen ser de gran tamaño, color verde, de forma ovalada o acorazonada con bordes dentados y superficie áspera, insertadas a lo largo del tallo de forma alternada. La flor presenta una estructura tipo capítulo, con diámetro considerable, constituida por numerosas flores pequeñas agrupadas en un receptáculo, generalmente de color amarillo o amarillo-anaranjado con flores de disco en la parte central. Finalmente, el fruto conocido como semilla de girasol,

se desarrolla a partir de las flores fértiles del capítulo, siendo el producto de mayor importancia en la planta (Seiler, 1997).

2.1.2. Valor nutricional

El girasol es reconocido por su alto valor nutricional, especialmente por sus semillas, que son un fruto versátil y se consumen con o sin cáscara. Aunque es un cultivo destinado a la producción de aceites, también puede utilizarse para la elaboración de harinas proteicas, aperitivos y como complemento de diversos alimentos. Esto se debe a que poseen alto contenido de ácidos grasos poliinsaturados, vitamina E, proteínas, fibras, selenio, cobre, zinc, folato y hierro que favorecen la prevención de enfermedades y efectos del envejecimiento (Martínez Carrera, 2024).

Además, las semillas de girasol brindan algunos beneficios antioxidantes, antimicrobianos, antiinflamatorios, antihipertensivos, cicatrizantes y cardiovasculares derivados de sus compuestos fenólicos, flavonoides, ácidos grasos poliinsaturados y vitaminas. Son utilizadas en etnomedicina para tratar diversas afecciones, como enfermedades cardíacas, infecciones bronquiales, laríngeas y pulmonares, tos y resfriados, y tos ferina. Estos notables beneficios medicinales, nutricionales y culinarios dan lugar a la popularidad creciente del girasol y sus componentes en todo el mundo (Guo *et al.* 2017).

Actualmente existen diversos tipos de girasoles, lo que permite clasificar sus semillas y asignar diferentes usos, es decir, para uso culinario (preparaciones saladas, dulces y guarniciones) o para la producción de aceites (Martínez Carrera, 2024).

2.1.3. Proceso de germinación del girasol

El proceso de germinación de una semilla es crucial en el ciclo de vida de las plantas, ya que influye en su crecimiento y desarrollo. En esta etapa, las plantas son más sensibles a factores abióticos que regulan la germinación de semillas, como el agua, la temperatura, las sales,

entre otros. De acuerdo con lo reportado por Luan *et al*. (2024), las semillas de girasol presentan las mejores tasas de germinación en condiciones de suelo no salinas.

La germinación de la semilla de girasol es un proceso que ocurre de la siguiente manera. En la primera etapa conocida como imbibición, las semillas absorben agua, incrementan su tamaño y experimentan procesos de hidrólisis. La cantidad de proteínas, carbohidratos y lípidos es influyente en el proceso de imbibición. En la segunda etapa se activa la producción de ATP mediante la glucólisis, el ciclo de Krebs y la cadena respiratoria. Finalmente, la radícula emerge de la cubierta (en este momento concluye el proceso de germinación) y forma una raíz capaz de absorber agua y energía para un crecimiento saludable. Es importante mencionar que el proceso de germinación repercute en las tasas de supervivencia de las plántulas y del cultivo, una germinación deficiente afecta la población de plantas, el rendimiento y la calidad del cultivo (Haj *et al.* 2023).

2**.1.4. Problemáticas en las semillas de girasol**

El girasol (*Helianthus annuus* L.) es un cultivo de importancia agrícola y nutricional. Sin embargo, su productividad y calidad dependen de la disponibilidad de micronutrientes esenciales. Por ejemplo, las deficiencias de Zn son uno de los principales problemas en la agronomía, debido a que provocan disminuciones en el rendimiento y calidad nutricional de los cultivos, particularmente en suelos con baja disponibilidad de nutrientes. Derivado de lo anterior, el uso de nanopartículas de Zn para la biofortificación de cultivos surge como una estrategia para incrementar la concentración de este elemento en las partes comestibles de una planta (Cakmak, 2008; Alloway, 2009).

2.2. Importancia de Zn en las plantas

El Zn es un elemento esencial para el crecimiento y desarrollo de plantas, animales y humanos. Aunque es un micronutriente que se requiere en pequeñas cantidades, su presencia es indispensable. Esto quiere decir que, aunque la mayoría de los nutrientes y la cantidad de agua sean adecuados, la deficiencia de Zn afecta el rendimiento y la calidad de los cultivos (Almendros *et al.* 2008). El Zn es importante en la fisiología, el metabolismo y la

reproducción; actúa como regulador de diversas enzimas, participa en la formación de clorofila, ayuda a la producción de auxinas (reguladores de crecimiento), participa en la producción de hormonas de crecimiento, entre otros (Das *et al.* 2016).

Además, el Zn ayuda a promover la resistencia de 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 *et al*. 2020). Aunque todos los cultivos son susceptibles a deficiencias de Zn, cada especie presenta una tolerancia diferente a la deficiencia de este micronutriente y utiliza más eficientemente las cantidades disponibles que el resto. Por todo lo anterior, el Zn 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 (Almendros *et al.* 2008).

2.2.1 Nanopartículas de óxido de zinc (NPs ZnO)

Recientemente las NPs ZnO han sido utilizadas como nanofertilizantes de diversos cultivos, debido a su potencial para mejorar la absorción de nutrientes en plantas, derivado de sus características fisicoquímicas únicas, como una alta relación superficie-volumen, reactividad química elevada y capacidad para interactuar a nivel celular con tejidos vegetales (Raliya and Tarafdar, 2013). Estas NPs ZnO presentan un tamaño entre 1 y 100 nm y morfologías controladas según las necesidades, lo que podría mejorar los perfiles de liberación y la absorción eficiente de nutrientes.

Comúnmente, las nanopartículas pueden obtenerse mediante moliendas físicas de un material a granel para disminuir su tamaño de partícula y mediante métodos químicos (sol-gel, descomposición térmica, síntesis solvotermal, coprecipitación química, biosíntesis verde) que permiten la síntesis de nanomateriales. Aunque ambas metodologías son utilizadas, es importante mencionar que, las características finales deseadas son el punto clave para la elección del método (Zanella, 2012; Abbasifar *et al.* 2020).

Una vez obtenido el nanofertilizante, puede aplicarse por vía foliar o directamente a la raíz, para posteriormente ingresar por las estomas y ser transportado a lo largo de toda la planta (Dimkpa *et al.* 2017). De acuerdo con lo reportado por Seleiman *et al.,* el uso de NPs ZnO en dosis adecuadas para el tratamiento de cultivos, incrementa el contenido de Zn en los tejidos vegetales y mejora la tasa de germinación, la actividad fotosintética y la resistencia al estrés abiótico (Seleiman *et al.* 2023).

2.1.2 Síntesis verde de nanopartículas de ZnO (GNPs ZnO)

La síntesis de GNPs ZnO mediante rutas verdes se refiere a aquellos métodos en los cuales se utilizan microorganismos, enzimas y plantas durante su proceso de obtención. Estas metodologías utilizan materiales que no son tóxicos, además de ser amigables con el medio ambiente y de bajo costo, lo cual las hace atractivas en comparación con las metodologías tradicionales. Básicamente, se requiere un extracto de planta que actúa como agente reductor y estabilizante de las nanopartículas, así como una solución de sal de Zn que actuará como el precursor metálico (Xu *et al*. 2021).

Usualmente la síntesis de nanopartículas por rutas verdes no requiere equipos ni precursores costosos para la obtención de productos de alta pureza y con gran rendimiento. Recientemente, las plantas han sido una fuente preferida para la síntesis de nanopartículas con morfologías y tamaños variados, ya que sus compuestos fitoquímicos favorecen las reacciones químicas para su obtención, además de facilitar su producción a gran escala (Agarwal e*t al*. 2017).

En una síntesis típica, inicialmente se selecciona la parte de la planta que servirá como fuente (raíz, tallo, hojas, etc.) para la extracción (incluye maceración, digestión y decocción) de los compuestos fitoquímicos, mediante calentamiento en disolventes específicos como agua, etanol y hexano (Chan *et al*. 2021). Después, se realiza una mezcla con la solución precursora de Zn a una temperatura y agitación controlada, posteriormente las nanopartículas obtenidas, se separan mediante un proceso de centrifugación y son lavadas en varias ocasiones para

eliminar impurezas. Finalmente, la muestra es calcinada a temperaturas elevadas (Jayachandran *et al.* 2021).

Es importante mencionar que los parámetros de reacción, como el tipo de extracto, la concentración, el pH, la temperatura, el tiempo, los precursores de sales, entre otros, influyen directamente en las características de las nanopartículas, como la morfología, el tamaño de partículas y su composición química (Jayachandran *et al.* 2021).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Material genético

Para este estudio se utilizó semilla de Girasol Híbrido Flor Var. Full Sun AgroGenial®. Las plántulas que producen estas semillas crecen rápido y resisten cambios climáticos, lo que las vuelve versátiles. Además, las flores resultantes son grandes y atractivas, superando las expectativas iniciales.

3.2 Determinación de la tasa de imbibición para cada especie evaluada

Se utilizó un lote de 50 semillas, colocadas en cajas Petri a las que se aplicaron 25 mL de agua destilada. Posteriormente se registró el peso de las semillas por hora y el resultado de la tasa de imbibición se calculó restando el peso de las semillas después de la imbibición menos el peso inicial. Con el fin de identificar el momento exacto en que las semillas detienen el primer proceso de la germinación, "imbibición de agua". El periodo de imbibición correspondiente a esta especie es de 16 h.

Las curvas de imbibición se utilizaron para determinar el tiempo en que la semilla completa la imbibición de agua, esto para determinar el tiempo que se consideró para la aplicación de tratamientos con GNPs ZnO en las semillas.

En cada tratamiento (0, 5, 10, 15 y 20 ppm) se utilizaron lotes de 100 semillas, cada lote correspondió a un tratamiento, los cuales fueron colocados en cajas Petri para la aplicación de tratamientos con GNPs ZnO, para dejar las semillas expuestas a los tratamientos durante el tiempo determinado en la curva de imbibición. Enseguida, se realizó un ensayo de germinación de acuerdo con las reglas de la ISTA (2004), a fin de determinar el impacto de los tratamientos con GNPs ZnO en la calidad fisiológica de la semilla. Para ello, se procedió a sembrar seis repeticiones de 25 semillas por tratamiento en hojas de papel Anchor, previamente humedecidas con agua destilada y se enrollaron en "forma de taco", se acomodaron aleatoriamente en una bolsa de polietileno transparente dentro de una canastilla, acomodando de manera aleatoria en la cámara germinadora Lab-line Instruments con

temperatura controlada (25 ± 1C°), un periodo de 16 horas de oscuridad y fotoperiodo de 8 horas luz. Se mantuvieron en estas condiciones durante el periodo de evaluación. Se consideró a cada uno de los tacos como una unidad experimental (25 semillas/taco).

Germinación: plántulas normales con plúmula y radícula emergida con una relación de dos veces el tamaño de la semilla, expresada en porcentaje.

Plántulas anormales**:** Las que presentaron algún defecto en sus estructuras esenciales, lo que les impide lograr un desarrollo normal, expresada en porcentaje.

Semillas sin germinar**:** Son consideradas las semillas que no germinaron por razones propias de la semilla expresada en porcentaje.

3.3 Fenoles totales

De los brotes obtenidos se pesaron 5 g de materia fresca (plúmula y radícula) y se mezclaron con 10 mL de metanol concentrado; enseguida fueron triturados en una licuadora durante 30 s. Posteriormente, las muestras se colocaron en tubos de ensayo y se centrifugaron a 4500 rpm; los sobrenadantes se recuperaron y almacenaron a -20 °C. Los resultados fueron reportados en miligramos equivalentes por kilogramo de muestra (mg GAE /100 g).

3.4 Propiedades antioxidantes (ABTS)

La capacidad antioxidante se determinó por el método ABTS (ácido 2,2'-azinobis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico)), utilizando el extracto fenólico y la solución ABTS para la reacción. El contenido de fenoles y la capacidad antioxidante se determinaron con referencia a lo establecido por Rodríguez-Salinas *et al.* (2020).

3.5 Diseño experimental y análisis estadístico

El experimento se organizó utilizando un diseño completamente aleatorio, más un grupo de control, con cinco tratamientos y cuatro repeticiones de 25 semillas cada uno. Los datos se analizaron a través de un análisis de varianza y la comparación de medias se realizó por medio de la prueba de Tukey ($\alpha \leq 0.05$) (SAS Institute, 2002).

.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ANVA de germinación

Los resultados del análisis de varianza indican que las concentraciones de Zn aplicadas como tratamientos a las semillas, afectaron significativamente las variables asociadas con la calidad fisiológica de semillas de girasol (Cuadro 1).

Cuadro 1. ANVA para las variables de germinación y plántulas anormales por la aplicación de tratamientos con Zn durante la imbibición de semillas.

FV	GL	GER (%)	PA (%)	SSG (%)
Tratamientos	4	1428.5*	1061.8*	33.3
Error	29	42.4	4.34	64.0
C V (%)		10.9	16.3	47.6

*, ** = Significativo al nivel de probabilidad 0.01, respectivamente; FV = Fuentes de variación; GL = Grados de libertad; CV = Coeficiente de variación; GER = Plántulas normales al primer conteo; PA = Plántulas anormales; SSG = Semillas sin germinar.

4.2 Calidad fisiológica de la semilla

Los resultados de calidad fisiológica de las semillas después del tratamiento con GNPs ZnO son positivos (Figura 1), debido a que todas las concentraciones promovieron la germinación en comparación con el control (0 ppm). La concentración que logró la mayor promoción fue 15 ppm, con incrementos del 51.2% en comparación con el control (Figura 1A). Además; los incrementos observados en el porcentaje de germinación tuvieron una influencia directa en las plántulas anormales (Figura 1B), donde el tratamiento control presentó un valor del 45.3%, mientras que los tratamientos con GNPs ZnO tienen un valor promedio del 21.8%, lo que representa mejoras del 51.8%.

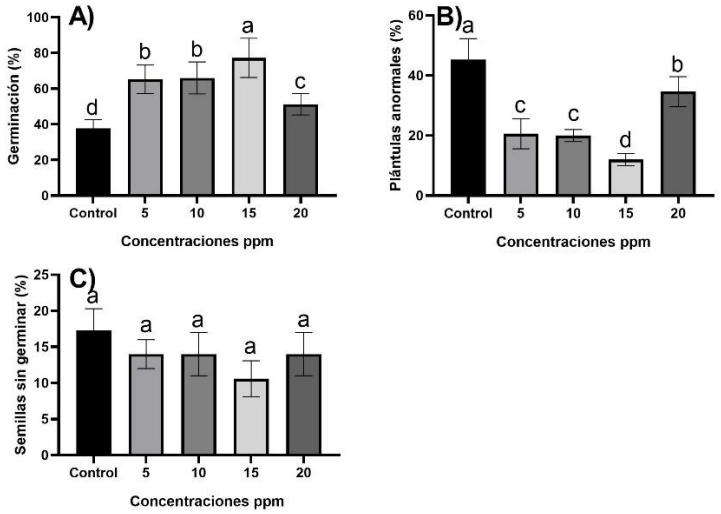


Figura 1. Porcentaje de germinación (A), plántulas anormales (B) y semillas sin germinar (C) en girasol por la aplicación a semillas GNPs ZnO (0-20 ppm). Las letras diferentes en cada barra indican que los tratamientos difirieron de forma significativa (Tukey, $p \leq 0,05$).

El efecto de NPs ZnO en un rango de 0 a 100 ppm en semillas de maíz ha sido estudiado, los resultados reportados indican una mayor tasa de germinación y en los parámetros de las plántulas, se reporta: longitud del tallo (13,0 cm), grosor del tallo (3,4 mm); longitud de la raíz (20,7 cm), grosor de la raíz (1,0 mm); longitud de la hoja (60 mm), anchura (16,0 mm); índice de vigor (2931,9) y producción de materia seca (5,33 g), con respuestas mejores que el control iónico (acetato de zinc) y el control normal (hidro-priming) (Itroutwar *et al.* 2020). Por otra parte, en semillas de girasol se determinó el efecto de NPs ZnO y de Fe, los resultados del estudio indicaron que las NPs ZnO aumentaron significativamente la velocidad de germinación, mientras que las de Fe afectaron negativamente la germinación (Al-Sudani *et al.* 2024). Los resultados de este estudio y los reportados en otros, sugieren que; el uso de nanopartículas (NPs) como agentes de activación (nanoactivación) podría aprovechar las ventajas de las NPs, como su rápida internalización y sus complejos efectos biológicos, que implican modificaciones fisiológicas y metabólicas durante la germinación, lo cual está determinado por el ingrediente activo del compuesto (Setty *et al.* 2023). Sin embargo, es importante considerar que el efecto estimulante del tratamiento con nanopartículas en

semillas depende del tamaño, la superficie, la morfología y la concentración del nanomaterial en estudio.

4.3 **ANVA de metabolitos secundarios y capacidad antioxidante**

En cuanto a los ANVA de fenoles totales y la capacidad antioxidante (Cuadro 2), los tratamientos con GNPs ZnO modificaron la concentración de metabolitos secundarios y las propiedades antioxidantes de los germinados provenientes de las semillas de girasol.

Cuadro 2. ANVA para las variables fenoles totales y capacidad antioxidante por la aplicación de tratamientos con Zn durante la imbibición de semillas.

FV	GL	Fenoles totales (mg GAE/100 g)	ABTS (µmolTE/100 g)
Tratamientos	4	289860.19*	2625137.42*
Error	10	17324.91	90345.96
C V (%)		5.60	5.10

*, ** = Significativo al nivel de probabilidad 0.01, respectivamente; FV = Fuentes de variación; GL = Grados de libertad; CV = Coeficiente de variación; ABTS = (2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfónico)).

4.4 Fenoles totales y ABTS

Todas las concentraciones con GNPs ZnO modificaron la concentración de fenoles en comparación con el control, sin presentar diferencias significativas entre concentraciones (Figura 2A). Según los resultados, el incremento promedio logrado con los tratamientos fue del 23% en comparación con el control (0 ppm). Debido a los incrementos mostrados en la concentración de fenoles totales, se presentaron tendencias similares en las propiedades antioxidantes para todos los tratamientos con GNPs ZnO, donde no se observan diferencias significativas entre concentraciones, pero sí en referencia al control, con un incremento promedio del 32.1% para la capacidad antioxidante por ABTS (Figura 2B).

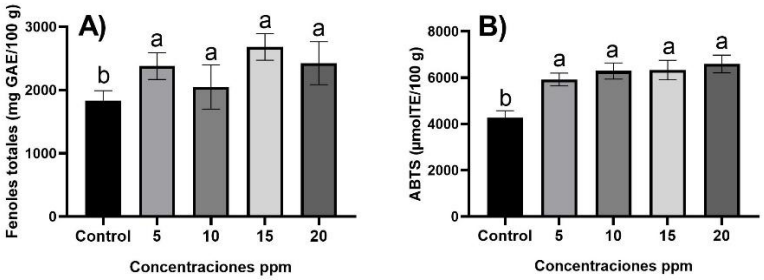


Figura 2. Fenoles totales (A) y propiedades antioxidantes DPPH (B) en brotes de semillas de girasol expuestas a tratamientos con NPs ZnO (0-20 ppm). Las letras diferentes en cada barra indican que los tratamientos difirieron de forma significativa (Tukey, $p \leq 0,05$).

Los resultados mostrados permiten confirmar que los tratamientos con GNPs ZnO estimulan la germinación, la acumulación de fenoles totales y la capacidad antioxidante. Naturalmente, la germinación de semillas genera incrementos de los compuestos fenólicos, los cuales son considerados como un mecanismo de defensa en las plantas (Xu *et al.* 2020). Por esta razón, las mejoras en la germinación de semillas y el incremento de metabolitos secundarios en las plántulas se han convertido en un tema de interés. Por ejemplo, un estudio realizado en semillas de chile habanero demostró que la aplicación de NPs ZnO mejoró el vigor de germinación y la acumulación de polifenoles en las plántulas; esto fue considerado como un mecanismo antioxidante (García-López *et al.* 2018). Por otra parte, el tratamiento previo a las semillas con $CaCl_2$ promovió la germinación y generó una concentración de polifenoles hasta 3.07 veces superior a la de las semillas no tratadas (Li *et al.* 2023).

Los resultados de la aplicación de GNPs ZnO obtenidos sobre la germinación respaldan que la aplicación de este compuesto tiene una influencia positiva en la germinación de semillas de girasol. Además, la producción de polifenoles en las semillas en procesos de germinación constituye un mecanismo de defensa frente al estrés oxidativo provocado por el metabolismo de la semilla y la acción del estrés abiótico y/o biótico. Por lo que el uso de nanocompuestos puede inducir un estrés adicional que desencadena una mayor síntesis de polifenoles y propiedades antioxidantes (Al-Sudani *et al.* 2024).

5. CONCLUSIONES

En este estudio se determinó el impacto de GNPs ZnO en concentraciones bajas (0, 5, 10, 15 y 20 ppm) sobre la germinación de semillas de girasol, el contenido de compuestos fenólicos totales (TPC) y el potencial antioxidante. Los resultados mostraron que las GNPs ZnO afectaron positivamente la germinación de las semillas, por lo que se presentó una reducción en el porcentaje de las plántulas anormales, y una reducción de las semillas sin germinar. Además, la aplicación de GNPs ZnO durante la germinación aumentó la concentración de metabolitos secundarios como los polifenoles, lo que resultó en una mayor capacidad antioxidante por el método de ABTS.

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.

Agarwal, H., Kumar, S. V., and Rajeshkumar, S. 2017. A review on green synthesis of zinc oxide nanoparticles–An eco-friendly approach. Resource-efficient technologies, 3(4), 406-413.

Aguilar-García, L., Escalante-Estrada, J. A., Fucikovsky-Zak, L., Tijerina-Chávez, L., y Engleman, E. M. 2005. Área foliar, tasa de asimilación neta, rendimiento y densidad de población en girasol. Terra Latinoamericana, 23(3), 303-310.

Alloway, B. J. 2009. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. Environmental geochemistry and health, 31(5), 537-548.

Almendros, P., Rico, M. I., López Valdivia, L. M., y Álvarez, J. M. 2008. Deficiencia de zinc en los cultivos y correctores de carencia del micronutriente.

Al-Sudani, W. K. K., Al-Shammari, R. S. S., Abed, M. S., Al-Saedi, J. H., Mernea, M., Lungu, I. I., Mihailescu, D. F. 2024. The impact of ZnO and Fe_2O_3 nanoparticles on sunflower seed germination, phenolic content and antiglycation potential. Plants, 13(13), 1724.

Baca Villagomez, E. 2025. Descripción fenotípica y rendimiento del cultivo de girasol (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Autónoma De México).

Cakmak, I. 2008. Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification?. Plant and soil, 302(1), 1-17.

Chan, Y. Y., Pang, Y. L., Lim, S., and Chong, W. C. 2021. Facile green synthesis of ZnO nanoparticles using natural-based materials: Properties, mechanism, surface

modification and application. Journal of environmental chemical engineering, 9(4), 105417.

Das, S., and Green, A. 2016. Zinc in crops and human health. Biofortification of food crops, 31-40.

Dimkpa, C. O., White, J. C., Elmer, W. H., and Gardea-Torresdey, J. 2017. Nanoparticle and ionic Zn promote nutrient loading of sorghum grain under low NPK fertilization. Journal of agricultural and food chemistry, 65(39), 8552-8559.

García-López, J. I., Zavala-García, F., Olivares-Sáenz, E., Lira-Saldívar, R. H., Díaz Barriga-Castro, E., Ruiz-Torres, N. A., and Niño-Medina, G. (2018). Zinc oxide nanoparticles boosts phenolic compounds and antioxidant activity of *Capsicum annuum* L. during germination. Agronomy, 8(10), 215.

Guo, S., Ge, Y., and Na Jom, K. 2017. A review of phytochemistry, metabolite changes, and medicinal uses of the common sunflower seed and sprouts (*Helianthus annuus* L.). Chemistry Central Journal, 11(1), 95.

Haj Sghaier, A., Khaeim, H., Tarnawa, Á., Kovács, G. P., Gyuricza, C., and Kende, Z. 2023. Germination and seedling development responses of sunflower (*Helianthus annuus* L.) seeds to temperature and different levels of water availability. Agriculture, 13(3), 608.

Itroutwar, P. D., Kasivelu, G., Raguraman, V., Malaichamy, K., Sevathapandian, S. K. 2020. Effects of biogenic zinc oxide nanoparticles on seed germination and seedling vigor of maize (*Zea mays*). Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 29, 101778.

Jayachandran, A., Aswathy, T. R., and Nair, A. S. 2021. Green synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles using Cayratia pedata leaf extract. Biochemistry and Biophysics Reports, 26, 100995.

Li, B., Shen, X., Shen, H., Zhou, Y., Yao, X. 2023. Effect of optimized germination technology on polyphenol content and hypoglycemic activity of mung bean. Frontiers in Nutrition, 10, 1138739.

Luan, Z., Xiao, M., Zhou, D., Zhang, H., Tian, Y., Wu, Y., and Song, Y. 2014. Effects of salinity, temperature, and polyethylene glycol on the seed germination of sunflower (*Helianthus annuus* L.). The Scientific World Journal, 2014 (1), 170418.

Martínez Carrera, K.E. 2024. Diseño De Investigación Del Desarrollo Y Caracterización De Un Paté Vegano A Base De Semilla De Girasol (*Helianthus annuus*), Universidad De San Carlos De Guatemala.

Raliya, R., and Tarafdar, J. C. 2013. ZnO nanoparticle biosynthesis and its effect on growth, colonization and zinc uptake by wheat (*Triticum aestivum* L.). Biology and Fertility of Soils, 49, 147–154.

Rodriguez-Salinas, P. A., Zavala-Garcia, F., Urias-Orona, V., Muy-Rangel, D., Heredia, J. B., and Nino-Medina, G. (2020). Chromatic, nutritional and nutraceutical properties of pigmented native maize (Zea mays L.) genotypes from the northeast of Mexico. Arabian Journal for Science and Engineering, 45(1), 95-112.

Seiler, G. J. (1997). Anatomy and morphology of sunflower. Sunflower technology and production, 35, 67-111.

Seleiman, M. F., Ahmad, A., Alhammad, B. A., and Tola, E. 2023. Exogenous application of zinc oxide nanoparticles improved antioxidants, photosynthetic, and yield traits in salt-stressed maize. Agronomy, 13(10), 2645.

Setty, J., Samant, S. B., Yadav, M. K., Manjubala, M., Pandurangam, V. 2023. Beneficial effects of bio-fabricated selenium nanoparticles as seed nanopriming agent on seed germination in rice (*Oryza sativa* L.). Scientific Reports, 13(1), 22349.

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.

Xu, J., Huang, Y., Zhu, S., Abbes, N., Jing, X., and Zhang, L. 2021. A review of the green synthesis of ZnO nanoparticles using plant extracts and their prospects for application

in antibacterial textiles. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 16, 15589250211046242.

Xu, M., Rao, J., Chen, B. 2020. Phenolic compounds in germinated cereal and pulse seeds: Classification, transformation, and metabolic process. Critical reviews in food science and nutrition, 60(5), 740-759.

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.