

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



Incremento de las Respuestas Fisiológicas y Propiedades Antioxidantes en
Germinados de Frijol por la Impregnación con NPs ZnO

Por:

JAIME NOEL MUÑOZ MACIAS

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México
Marzo 2026

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

Incremento de las Respuestas Fisiológicas y Propiedades Antioxidantes en
Germinados de Frijol por la Impregnación con NPs ZnO

Por:

JAIME NOEL MUÑOZ MACIAS

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. CARMEN ALICIA AYALA CONTRERAS
Asesor Principal Externo


M.C. DANIEL ALDACO GOMEZ
Coasesor


DRA. PATRICIA ADRIANA DE LEON MARTINEZ
Coasesor


DR ALBERTO SANDOVAL RANGEL
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México
Marzo 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, vídeos, 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

Jaime Noel Muñoz Macías

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de este trabajo.

Agradezco a mis profesores por compartir sus conocimientos y por guiarme durante mi formación académica.

DEDICATORIA

A mis padres, por su amor, apoyo incondicional y por ser el pilar fundamental en mi vida. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo y por impulsarme a cumplir mis metas.

A mi familia, por estar siempre presentes, brindándome ánimo y motivación durante este camino.

También dedico este logro a todas las personas que creyeron en mí y que de alguna manera contribuyeron a que este sueño se hiciera realidad.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

DEDICATORIA	iii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO	iv
ÍNDICE DE CUADROS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
RESUMEN	vii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Hipótesis	2
1.2 Objetivo	2
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Importancia de los germinados funcionales en la alimentación humana	3
2.3 Nanomateriales en la impregnación de semillas	4
2.4 Biofortificación cultivos	4
2.5 Métodos de biofortificación	5
3. MATERIALES Y MÉTODOS	7
3.1 Material genético	7
3.2 Determinación de la tasa de imbibición para cada especie evaluada	7
3.3 Determinación de polifenoles	8
3.4 Propiedades antioxidantes	8
3.5 Diseño experimental y análisis estadístico	8
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	9
4.1 ANOVA del efecto de los tratamientos en la germinación	9
4.2 Comparación de medias de las variables relacionadas con la germinación	9
4.3 ANOVA para fenoles y capacidad antioxidante	11
4.4 Comparación de medias para fenoles y ABTS	11
5. CONCLUSIONES	13
6. LITERATURA CITADA	14

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Respuesta fisiológica de semillas de frijol impregnadas con NPs ZnO.....	9
Cuadro 2. Concentración de fenoles y capacidad antioxidante en germinados de frijol impregnados con NPs ZnO.....	11

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Impregnación de semillas con nanomateriales cerámicos.....	6
Figura 2. Germinación (a), plántulas anormales (b) y semillas sin germinar (c) en semillas de frijol impregnadas NPs ZnO con concentraciones de 0 a 20 mg L ⁻¹ . Repeticiones (n=6).....	10
Figura 3. Fenoles totales (a) y capacidad antioxidante (b) en germinados de frijol impregnados con NPs ZnO con concentraciones de 0 a 20 mg L ⁻¹ . Repeticiones (n=6).	12

RESUMEN

El consumo de brotes y germinados en la dieta humana se ha incrementado, por tal motivo hoy en día se ha prestado atención en desarrollar tecnologías enfocadas a mejorar el aporte nutricional y nutracéutico de los germinados. En esta investigación se determinó el impacto de la impregnación con nanopartículas de óxido de zinc (NPs ZnO) en semillas de frijol sobre las respuestas fisiológicas (variables relacionadas con la germinación) y propiedades antioxidantes en los germinados obtenidos. El estudio se realizó en laboratorio (cámara de crecimiento), en principio se determinó el periodo de imbibición de las semillas (17 h), tiempo utilizado para dar el impregnado de las semillas con los tratamientos de NPs ZnO a concentraciones de 0, 5, 10, 15 y 20 mg L⁻¹. Después de la evaluación, los resultados indican que la aplicación de NPs ZnO mejoró considerablemente los porcentajes de germinación, lo que resultó en disminuciones de las plántulas anormales. Las evaluaciones químicas también permitieron identificar que todos los tratamientos aplicados con NPs ZnO incrementaron la concentración de fenoles totales, y, por ende, un incremento de las propiedades antioxidantes de los germinados.

Palabras clave: *Phaseolus vulgaris* L., NPs ZnO, germinación, fenoles totales, capacidad antioxidante.

1. INTRODUCCIÓN

Los germinados de semillas hoy en día se consumen en todo el mundo, siendo considerados como un alimento sencillo de producir, además de contener una alta concentración de proteínas, carbohidratos, vitaminas y minerales (Riggio et al., 2019). Los germinados de leguminosas han sido de los más consumidos en la dieta humana, sin embargo, recientemente las casas comerciales ofertan una amplia variedad de brotes, provenientes de diversas semillas como alfalfa, trigo sarraceno, col lombarda y brócoli, los cuales se utilizan en platillos (Aloo et al., 2021).

Por la importancia que han ganado los germinados en las últimas décadas, se ha trabajado en mejorar significativamente los sistemas de producción, considerando técnicas más sofisticadas y diversos métodos para mejorar las propiedades nutricionales y nutracéuticas de los germinados (Świeca y Dziki, 2015). Dentro de la diversidad de técnicas empleadas para la producción de germinados, se ha destacado el uso de nanomateriales para la impregnación de semillas (Al-Sudani et al., 2024). La nanotecnología es una tecnología emergente, la cual utiliza nanopartículas pequeñas (1-100 nm) que son aplicadas como fertilizantes en la producción de cultivos, estos materiales permiten una liberación lenta y gradual del ingrediente activo (Ruiz-Torres et al., 2021).

La impregnación de semillas con nanomateriales es una técnica relativamente sencilla, en la cual se pretende influir directamente en la fase I de imbibición, ya que se involucra una rápida absorción de agua y minerales al interior de las semillas a los espacios apoplásticos, por esta razón es factible aplicar nanocompuestos en esta etapa, a fin de que influyan en el metabolismo de la semilla en las fases II y III en las cuales se sintetizan proteínas y comienza la división celular. Se ha documentado que la impregnación de semillas durante la germinación estimula positivamente el crecimiento de plántulas y la acumulación de biomasa en germinados de leguminosas y trigo (Stańanowska et al., 2023). Además, se ha demostrado que la impregnación de semillas de *Solanum lycopersicum* con NPs ZnO generó altos niveles de clorofila, fenoles totales y capacidad antioxidante en los germinados, sin llegar a afectar las respuestas fisiológicas (kumar et al., 2025). Tomando en cuenta el uso potencial de las NPs ZnO como fertilizantes en la impregnación de semillas, es necesario que se continúen realizando investigaciones para comprender en mayor medida los impactos positivos y/o negativos que pueden generar en la producción de germinados y sus posibles

mecanismos de influencia sobre las respuestas bioquímicas. Por lo tanto, en el presente estudio se determinó el impacto de NPs ZnO sobre las respuestas fisiológicas de la germinación y la acumulación de fenoles totales y capacidad antioxidante en germinados de frijol.

1.1 Hipótesis

H_i: La impregnación de semillas de frijol con NPs ZnO a concentraciones 0, 5, 10, 15 y 20 mg L⁻¹, modificará las respuestas fisiológicas de la germinación, la acumulación de fenoles totales y la capacidad antioxidante de los germinados.

H₀: La impregnación de semillas de frijol con NPs ZnO a concentraciones 0, 5, 10, 15 y 20 mg L⁻¹, no modificará las respuestas fisiológicas de la germinación ni la acumulación de polifenoles.

1.2 Objetivo

Determinar el impacto de NPs ZnO sobre las respuestas fisiológicas de la germinación, la acumulación de fenoles totales y la capacidad antioxidante en germinados de frijol.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Importancia de los germinados funcionales en la alimentación humana

En la actualidad, se ha presentado una demanda creciente de los alimentos nutraceuticos con propiedades antioxidantes como lo son los germinados. La germinación de semillas, es un proceso metabólico donde se activan enzimas hidrolíticas que participan en la descomposición de azúcares, proteínas y lípidos a productos de bajo peso molecular, los cuales pueden ser aprovechados por el embrión para generar una plántula (Ampofo y Abbey, 2023). El producto final de la germinación, es una plántula que puede contener una elevada concentración de proteínas y fitoquímicos como los polifenoles (Miyahira et al., 2021). Se ha documentado que la ingesta de polifenoles en la dieta humana, puede contribuir positivamente en la regulación del metabolismo, ayudando en el control del peso, enfermedades crónicas y regulación del estrés oxidativo que pueden generar los radicales libres (Cory et al., 2018). Debido al aporte nutricional y nutraceutico, los germinados se están convirtiendo en una fuente prometedora de alimentos funcionales en todo el mundo, los principales germinados que destacan en cuanto al consumo son los cereales, vegetales y legumbres (Majzoobi et al., 2023).

Dentro de los diferentes tipos de germinados, destacan los germinados de frijol, ya que son un alimento funcional con alta concentración de vitamina C, fibra, proteínas y antioxidantes, lo que fortalece el sistema cardiovascular, ayuda a la digestión y contribuyen en controlar los niveles de azúcares. Hafidh et al. (2015), documentaron que el consumo de germinados de frijol redujo infecciones virales, lo que permite la posibilidad de indagar sobre el futuro de los fitoquímicos que participan como antivirales. Sin embargo, a pesar de la relevancia de los germinados como alimentos funcionalizados, se ha prestado poca atención al uso de los nanomateriales en la producción de germinados, composición nutricional y composición química de las semillas germinadas y sus productos derivados (Peñas y Martínez-Villaluenga, 2020).

2.3 Nanomateriales en la impregnación de semillas

El pretratamiento de semillas con nanomateriales de Zn, Cu, An y Mg durante la germinación de semillas es una técnica que puede mejorar el porcentaje de germinación, debido a cambios asociados en el metabolismo de las semillas que permiten lograr obtener germinados con mayores propiedades antioxidantes (Silva Fonseca et al., 2024). Durante el proceso de impregnación de semillas con nanomateriales, es de prioridad considerar el tamaño de las nanopartículas (NPs) y el tiempo de imbibición de la semilla para que el ingrediente activo pueda penetrar al interior de la semilla y de esta manera influir durante las fases I (imbibición) y II (activación del metabolismo durante la germinación (do Espirito Santo Pereira et al., 2021).

La impregnación de semillas con nanomateriales ceramicos permite mejorar la protección de semillas durante el manejo potcosecha, además de tener la dualidad de promover la germinación y obtener plántulas más vigorosas con mayor aporte nutricional y nutracéutico (López-Vargas et al., 2020). Además, la impregnación de semillas con nanomateriales también puede utilizarse para la biofortificación de semillas, con el fin de mejorar el aporte nutricional de los alimentos (do Espirito Santo Pereira et al., 2021).

2.4 Biofortificación cultivos

El 75% de la población mundial se ve afectada por carencias de minerales (González et al., 2020). Las deficiencias más comunes son por zinc y hierro, lo que puede afectar el desarrollo humano y traer consigo problemas severos para el sistema inmunológico. Ante esta problemática, se ha comenzado a captar la atención en el uso de nanomateriales para biofortifugar los cultivos agronómicos (De La Torre-Roche et al., 2020).

El enfoque agronómico tradicional para lograr la biofortificación de cultivos es a través de la aplicación de fertilizantes al suelo y foliar, siendo una forma rápida y económica de producir alimentos ricos en nutrientes (como hierro y zinc). La biofortificación agronómica permite la aplicación de fertilizantes como micronutrientes para enriquecer la parte comestible de los cultivos con micronutrientes (Morfín-Gutiérrez et al., 2025).

2.5 Métodos de biofortificación

Dentro de las técnicas de biofortificación biológicas pueden clasificarse en dos categorías, 1: emplea métodos agronómicos (por ejemplo, el uso de fertilizantes ricos en micronutrientes) y 2) empleado un método de mejoramiento genético.

Mejoramiento genético: La biofortificación convencional consiste en el cruzamiento repetido de plantas que presentan ciertas características deseadas, como pueden ser resistencia al estrés, altos rendimientos, altos contenidos en nutrientes, entre otros. Obteniéndose plantas híbridas mejoradas, para la producción de cultivos básicos enriquecidos de ciertos micronutrientes (Morfín-Gutiérrez et al., 2025).

Biofortificación agronómica: Una fertilización agronómica, se puede llevar a cabo mediante tres técnicas diferentes, aplicaciones al suelo, foliares y en semillas. Específicamente, la nanoimpregnación en semillas se realiza durante la etapa de imbibición, técnicamente conocida como fase I, en la cual se determina el tiempo de imbibición de la semilla, periodo que es utilizado para que la semilla pueda absorber nutrientes y agua, lo que resulta en la liberación de la fotodormancia y termodormancia. En la fase II, se activan los procesos metabólicos, que implica la activación de enzimas como la alfa y beta amilasa, que participan en la degradación de compuestos del endospermo. Para la tercera fase III, se vuelve a presentar una rehidratación, lo que se caracteriza por una mayor absorción de agua, lo que permite iniciar la división celular y la emergencia de la radícula y plúmula (Fonseca et al., 2024). En la Figura 1, se presenta parte de la metodología que se tiene que realizar para llevar a cabo el tratamiento de impregnación de semillas con nanomateriales cerámicos.



Figura 1. Impregnación de semillas con nanomateriales cerámicos.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Material genético

Se realizó el experimento en condiciones de laboratorio, utilizando semillas de frijol ejotero Var. Strike®. El experimento se estableció con seis repeticiones y cinco tratamientos, (0, 5, 10, 15 y 20 mg L⁻¹) con nanopartículas cerámicas de Zn (NPs ZnO). Para la aplicación de tratamientos, se determinó el periodo de imbibición, fase que hace referencia a la primera etapa de germinación y periodo en el que fue expuesto cada material genético al tratamiento con nanopartículas.

3.2 Determinación de la tasa de imbibición para cada especie evaluada

Se utilizó un lote con 50 semillas, colocadas en cajas Petri y sobre papel filtro, en donde se aplicó 25 ml de agua destilada. Posteriormente se tomó el peso del lote de 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 primero proceso de la germinación, “imbibición de agua”. El periodo de imbibición correspondiente a esta especie es de 17 h.

Las curvas de imbibición permitieron comprender la dinámica del agua en las semillas, para establecer pre-tratamientos a base de NPs.

Para cada tratamiento se seleccionaron seis lotes de 150 semillas al azar, cada uno correspondiente a cada tratamiento, colocándolos en cajas petri y sobre papel filtro, en donde se aplicó los tratamientos por el periodo de imbibición determinado para cada especie. Posteriormente se realizó un ensayo de germinación de acuerdo a las reglas de la ISTA (2004), con la finalidad de conocer la capacidad germinativa y el vigor de la semilla. 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 ($25 \pm 1\text{C}^\circ$), un periodo de 16 h de oscuridad y

fotoperiodo de 8 h 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).

Plántulas normales %: Plantas con estructuras bien desarrolladas y funcionales.

Plántulas anormales %: Aquellas que carecen en el desarrollo de estructuras esenciales.

Semillas sin germinar %: Semillas que no germinan.

3.3 Determinación de polifenoles

De los germinados obtenidos se pesaron 5 g de materia fresca y se mezclaron con 10 mL de metanol concentrado, enseguida fueron triturados en una licuadora durante 30 s. La mezcla se centrifugó a 4500 rpm, los sobrenadantes fueron utilizados como extractos antioxidantes. Para determinación de antioxidantes se utilizó ácido gálico como estándar de referencia, calculado a partir de la curva de calibración del ácido gálico de 0 a 200 mg L⁻¹, los resultados fueron reportados en miligramos equivalente por kilogramo de muestra (mg GAE/ 100 g).

3.4 Propiedades antioxidantes

El radical ABTS ácido 2,2'-azinobis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico)), para determinar la capacidad antioxidante. Los polifenoles y ABTS se realizaron con referencia a lo establecido por Rodríguez-Salinas *et al.* (2020).

3.5 Diseño experimental y análisis estadístico

Los resultados fueron analizados con un modelo lineal general y la prueba de de Tukey ($\alpha \leq 0.05$) (SAS Institute, 2002).

.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ANOVA del efecto de los tratamientos en la germinación

Los resultados indican que el efecto de la aplicación de tratamientos con NPs ZnO afectó significativamente las respuestas germinativas y la generación de plántulas anormales en semillas de frijol. En cuanto a las semillas sin germinar, no se presentó un efecto significativo

Cuadro 1. Respuesta fisiológica de semillas de frijol impregnadas con NPs ZnO.

FV	GL	Germinación (%)	PA (%)	SSG (%)
Concentraciones	4	1252.84*	765.18**	157.03
Error	25	494.10	70.81	84.70
C.V.		36.74	80.11	90.51

*, **= Significativo al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad, respectivamente; FV= Fuentes de variación; GL= Grados de libertad; PA= Plántulas anormales; SSG= Semillas sin germinar; C.V= Coeficiente de variación.

4.2 Comparación de medias de las variables relacionadas con la germinación

Los resultados indican que todos los tratamientos mejoraron la germinación de las semillas de frijol (Figura 2). Los mayores incrementos se presentaron a 15 y 20 mg L⁻¹ con incrementos promedio del 45.03% en comparación con el testigo. Debido a los incrementos de la germinación, el porcentaje de plántulas anormales se modificó, se observa que a medida que se incrementan las concentraciones se da una reducción gradual en el porcentaje de plántula anormales, con diferencias porcentuales del 79.2% entre el testigo y el tratamiento de 20 mg L⁻¹. En cuanto a las semillas sin germinar todos los tratamientos fueron estadísticamente iguales.

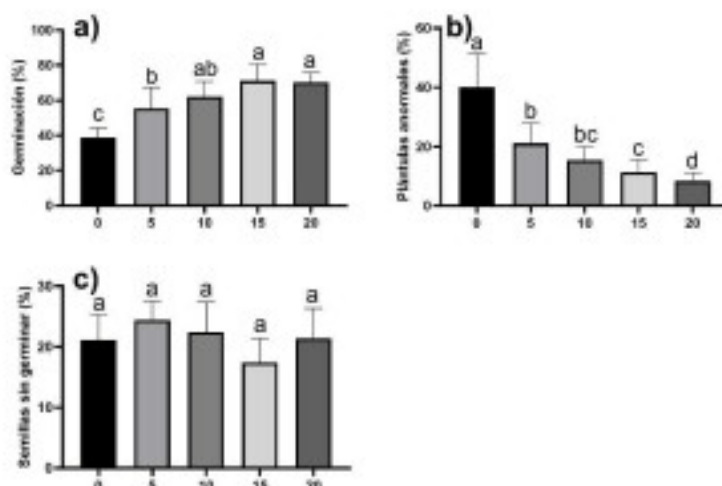


Figura 2. Germinación (a), plántulas anormales (b) y semillas sin germinar (c) en semillas de frijol impregnadas NPs ZnO con concentraciones de 0 a 20 mg L⁻¹. Repeticiones (n=6).

En este estudio, se comprobó que la aplicación de NPs ZnO modificó positivamente la germinación de semillas de frijol. Un estudio realizado en semillas de chile y tomate que fueron tratadas con nanopartículas de Zn, encontró resultados similares, indicando que la germinación mejoró en más de un 50 y 90%, respectivamente (Sánchez-Pérez et al., 2023). No obstante, la literatura indica que el efecto de las NPs ZnO depende de la especie y de la técnica de impregnación de las semillas (Sarkhosh et al., 2022). Como ejemplo, se cita el estudio realizado por Raja et al. (2022), quienes reportaron que, en semillas de frijol negro la concentración de 600 mg L⁻¹ afectó positivamente la germinación y vigor de las semillas, lo que resultó en plántulas más vigorosas. Otro estudio realizado en semillas de pimiento, demostró que la aplicación in vitro de NPs ZnO con morfología esférica a 100 mg L⁻¹, generó los mejores resultados para los parámetros de crecimiento de plántulas y las respuestas fisiológicas para la acumulación de clorofilas (Magdaleno-García et al., 2023).

Es importante considerar, que en este tipo de estudios el efecto positivo y/o negativo está influenciado por factores como la concentración, el tamaño de partícula, el tiempo y método de impregnación y el tipo de especie vegetal (Nurlaelah et al., 2025). Por lo anterior, es necesario determinar la influencia de los nanomateriales en las respuestas bioquímicas de los germinados, a

fin de tener un mejor entendimiento de la interacción especie, NPs ZnO y las respuestas fisiológicas y bioquímicas.

4.3 ANOVA para fenoles y capacidad antioxidante

La aplicación de nanomateriales modificó significativamente la concentración de polifenoles y las propiedades antioxidantes medidas por el método ABTS (Cuadro 2).

Cuadro 2. Concentración de fenoles y capacidad antioxidante en germinados de frijol impregnados con NPs ZnO.

FV	GL	Fenoles (mg GAE/100 g)	ABTS μmol TE/100 g
Concentraciones	4	179424.37*	8173677.81*
Error	10	52233.42	320180.33
C.V.		27.29	31.60

*, **= Significativo al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad, respectivamente; FV= Fuentes de variación; GL= Grados de libertad; C.V= Coeficiente de variación.

4.4 Comparación de medias para fenoles y ABTS

Para la concentración de fenoles y capacidad antioxidante por ABTS, se observa un incremento gradual positivo a medida que se aumentan las dosis con NPs ZnO (Figura 3). En el caso de fenoles, la mayor concentración se obtuvo con 20 mg L⁻¹, con incrementos del 52.4% en comparación con el testigo. Para ABTS, todos los tratamientos fueron estadísticamente diferentes y superiores al testigo, pero entre concentraciones no se presentaron diferencias significativas.

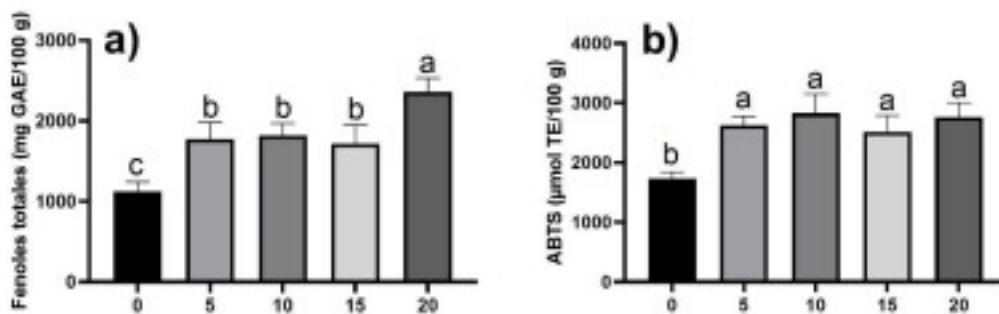


Figura 3. Fenoles totales (a) y capacidad antioxidante (b) en germinados de frijol impregnados con NPs ZnO con concentraciones de 0 a 20 mg L⁻¹. Repeticiones (n=6).

Los resultados de esta investigación han verificado que el uso de NPs ZnO modifica la germinación positivamente, además de generar una mayor acumulación de compuestos antioxidantes en los germinados sin llegar a afectar las respuestas fisiológicas de la germinación. Un estudio realizado en semillas de tomate, reportó que los análisis bioquímicos por la aplicación de NPs ZnO en concentraciones de 25 a 1000 mg L⁻¹, incrementó considerablemente la concentración de fenoles totales, capacidad antioxidante y prolina, además de una reducción en la peroxidación lipídica. Estos efectos los atribuyen a mejorar de la homeostasis y eficiencia metabólica (Kumar et al., 2025). Los polifenoles son metabolitos secundarios que se incrementan en concentración ante estrés biótico y abiótico como mecanismos de defensa ante el estrés que puedan generar la aplicación de NPs ZnO. Esos compuestos pueden contribuir en mejoras de las propiedades antioxidantes al estabilizar radicales libres, la estabilización de membranas y el ajuste osmótico, ya que pueden ceder átomos de hidrógeno (Salehi et al., 2021). Los cambios generados en la germinación y acumulación de polifenoles, se pueden atribuir al pequeño tamaño de las NPs ZnO lo que permite su entrada a las células vegetales, esto también puede generar estrés oxidativo y la peroxidación de lípidos, por lo que el metabolismo antioxidante se puede activar para proteger a los germinados del estrés (Srivastav et al., 2021).

5. CONCLUSIONES

La impregnación de semillas de frijol con NPs ZnO generó cambios positivos en la fisiología de las semillas, sin llegar a modificar las semillas sin germinar. En la germinación las concentraciones de 15 y 20 mg L⁻¹ presentaron incrementos promedio del 45% en comparación con el testigo, estos incrementos permitieron una reducción significativa en el porcentaje de plántulas anormales en los tratamientos con NPs ZnO. Además de las mejoras en la germinación, con la aplicación de NPs ZnO se obtuvieron incrementos significativos en la concentración de fenoles totales y la capacidad antioxidante medida por ABTS debido a la impregnación de semillas con las NPs ZnO.

6. LITERATURA CITADA

- Aloo, S. O., Ofosu, F. K., Kilonzi, S. M., Shabbir, U., and Oh, D. H. 2021. Edible plant sprouts: Health benefits, trends, and opportunities for novel exploration. *Nutrients*, 13(8), 2882.
- Al-Sudani, W. K. K., Al-Shammari, R. S. S., Abed, M. S., Al-Saedi, J. H., Mernea, M., Lungu, I. I., and Mihailescu, D. F. 2024. The impact of ZnO and Fe₂O₃ nanoparticles on sunflower seed germination, phenolic content and antiglycation potential. *Plants*, 13(13), 1724.
- Ampofo, J., and Abbey, L. 2023. Sprouted legumes: biochemical changes, nutritional impacts and food safety concerns. In *Advances in Plant Sprouts: Phytochemistry and Biofunctionalities* (pp. 173-199). Cham: Springer International Publishing.
- Cory, H., Passarelli, S., Szeto, J., Tamez, M., and Mattei, J. 2018. The role of polyphenols in human health and food systems: A mini-review. *Frontiers in nutrition*, 5, 370438.
- De La Torre-Roche, R., Cantu, J., Tamez, C., Zuverza-Mena, N., Hamdi, H., Adisa, I. O., and White, J. C. (2020). Seed biofortification by engineered nanomaterials: a pathway to alleviate malnutrition?. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(44), 12189-12202.
- do Espirito Santo Pereira, A., Caixeta Oliveira, H., Fernandes Fraceto, L., and Santaella, C. 2021. Nanotechnology potential in seed priming for sustainable agriculture. *Nanomaterials*, 11(2), 267.
- Fonseca, J. D. D. S., Wojciechowska, E., Kulesza, J., and Barros, B. S. 2024. Carbon nanomaterials in seed priming: Current possibilities. *ACS omega*, 9(45), 44891-44906.
- González, Z. F., Font, A. J. Q., Ochoa, M. Y. M., Rodríguez, E. C., and Estrada, A. M. B. (2020). La malnutrición; problema de salud pública de escala mundial. *Multimed*, 24(1).
- Hafidh, R. R., Abdulmir, A. S., Abu Bakar, F., Sekawi, Z., Jahansheri, F., and Jalilian, F. A. 2015. Novel antiviral activity of mung bean sprouts against respiratory syncytial virus and herpes simplex virus- 1: an in vitro study on virally infected Vero and MRC-5 cell lines. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 15(1), 179.
- Kumar, S. M., Yadav, S., Choudhary, R., Anumantharaj, A., Yadav, A., Hussain, Z., and Yadav, S. K. 2025. Nanopriming with zinc oxide nanoparticle boosts seed vigour, photosynthesis, osmolytes accumulation and antioxidant activity in tomato. *Scientific Reports*, 15(1), 37375.
- López-Vargas, E. R., González-García, Y., Pérez-Álvarez, M., Cadenas-Pliego, G., González-Morales, S., Benavides-Mendoza, A., and Juárez-Maldonado, A. 2020. Seed priming with carbon nanomaterials to modify the germination, growth, and antioxidant status of tomato seedlings. *Agronomy*, 10(5), 639.
- Magdaleno-García, G., Juárez-Maldonado, A., Betancourt-Galindo, R., González-Morales, S., Cabrera-De La Fuente, M., Sánchez-Vega, M., & Méndez-Lopez, A. (2023). Zinc oxide nanoparticle morphology modify germination and early growth of bell pepper seedlings. *Biotechnia*, 25(3), 5-15.

- Majzoobi, M., Wang, Z., Teimouri, S., Pematilleke, N., Brennan, C. S., and Farahnaky, A. 2023. Unlocking the potential of sprouted cereals, pseudocereals, and pulses in combating malnutrition. *Foods*, 12(21), 3901.
- Miyahira, R. F., Lopes, J. D. O., and Antunes, A. E. C. 2021. The use of sprouts to improve the nutritional value of food products: A brief review. *Plant Foods for Human Nutrition*, 76(2), 143-152.
- Morfin-Gutiérrez, A., García-López, J. I., Ruiz-Torres, N. A., Álvarez-Vázquez, P., and Hernández-Juárez, A. 2025. Small-giants in agriculture: how can nanoparticles improve cereal biofortification?. *Advanced Agrochem*.
- Nurlaelah, E., Handayani, W., Yuniati, R., and Sazali, E. S. 2025. The effect of biogenic silver nanoparticles on the germination and phenophase of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) var. Anjasmoro. *Plant Nano Biology*, 13, 100170.
- Peñas, E., and Martínez-Villaluenga, C. 2020. Advances in production, properties and applications of sprouted seeds. *Foods*, 9(6), 790.
- Raja, K., Sowmya, R., Sudhagar, R., Moorthy, P. S., Govindaraju, K., and Subramanian, K. S. 2019. Biogenic ZnO and Cu nanoparticles to improve seed germination quality in blackgram (*Vigna mungo*). *Materials Letters*, 235, 164-167.
- Riggio, G. M., Wang, Q., Kniel, K. E., and Gibson, K. E. 2019. Microgreens—A review of food safety considerations along the farm to fork continuum. *International journal of food microbiology*, 290, 76-85.
- Rodríguez-Salinas, P. A., Zavala-García, 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.
- Ruiz-Torres, N., Flores-Naveda, A., Barriga-Castro, E. D., Camposeco-Montejo, N., Ramírez-Barrón, S., Borrego-Escalante, F., and García-López, J. I. 2021. Zinc oxide nanoparticles and zinc sulfate impact physiological parameters and boosts lipid peroxidation in soil grown coriander plants (*Coriandrum sativum*). *Molecules*, 26(7), 1998.
- Salehi, H., De Diego, N., Rad, A. C., Benjamin, J. J., Trevisan, M., and Lucini, L. 2021. Exogenous application of ZnO nanoparticles and ZnSO₄ distinctly influence the metabolic response in *Phaseolus vulgaris* L. *Science of the Total Environment*, 778, 146331.
- Sánchez-Pérez, D. M., Márquez-Guerrero, S. Y., Ramírez-Moreno, A., Rodríguez-Sifuentes, L., Galindo-Guzmán, M., Flores-Loyola, E., and Marszałek, J. E. 2023. Impact of biologically and chemically synthesized zinc oxide nanoparticles on seed germination and seedlings' growth. *Horticulturae*, 9(11), 1201.

Sarkhosh, S., Kahrizi, D., Darvishi, E., Tourang, M., Haghighi-Mood, S., Vahedi, P., and Ercisli, S. 2022. Effect of zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs) on seed germination characteristics in two Brassicaceae family species: *Camelina sativa* and *Brassica napus* L. *Journal of Nanomaterials*, 2022(1), 1892759.

Srivastav, A., Ganjewala, D., Singhal, R. K., Rajput, V. D., Minkina, T., Voloshina, M., and Shrivastava, M. 2021. Effect of ZnO nanoparticles on growth and biochemical responses of wheat and maize. *Plants*, 10(12), 2556.

Stałańska, K., Szablińska-Piernik, J., Okorski, A., and Lahuta, L. B. 2023. Zinc oxide nanoparticles affect early seedlings' growth and polar metabolite profiles of pea (*Pisum sativum* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Molecular Sciences*, 24(19), 14992.

Świeca, M., and Dziki, D. 2015. Improvement in sprouted wheat flour functionality: Effect of time, temperature and elicitation. *International Journal of Food Science and Technology*, 50(9), 2135-2142.