

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Efecto del lixiviado de lombricompost y nanopartículas de zinc en la germinación de chiltepín (*Capsicum annuum* var. *Glabriusculum*)

Por:

Abner Obed Ramírez Salazar

TESIS

Presentada como requerimiento parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

Torreón, Coahuila, México

Abril 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Efecto del lixiviado de lombricompost y nanopartículas de zinc en la germinación de chiltepín (*Capsicum annuum* var. *Glabriusculum*)

Por:

Abner Obed Ramírez Salazar

TESIS

Que somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

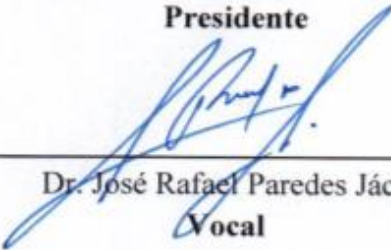
Aprobado por:



Dr. Luis Abraham Chaparro Encinas
Presidente



Dr. Fabián García Espinoza
Vocal



Dr. José Rafael Paredes Jácome
Vocal



M.D. Juan Manuel Nava Santos
Vocal suplente



MC. Rafael Ávila Cisneros
Coordinador de la División de Carreras Agronómicas



Coordinación de la División de Carreras Agronómicas

Torreón, Coahuila, México
Abril 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Efecto del lixiviado de lombricompost y nanopartículas de zinc en la germinación de chiltepín (*Capsicum annuum* var. *Glabriusculum*)

Por:

Abner Obed Ramírez Salazar

TESIS

Presentado como Requisito Parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

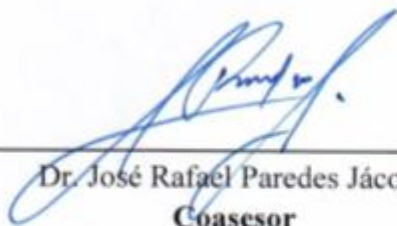
Aprobado por el Comité de Asesoría:



Dr. Luis Abraham Chaparro Encinas
Asesor Principal



Dr. Fabián García Espinoza
Coasesor



Dr. José Rafael Paredes Jácome
Coasesor



M.D. Juan Manuel Nava Santos
Coasesor



MC. Rafael Ávila Cisneros
Coordinador de la División de Carreras Agronómicas



Torreón, Coahuila, México
Abril 2026

DEDICATORIA

A mis padres Esiquio Ramírez Fierro y Gloria Esther Salazar Guillén, pilares de mi existencia, que con su amor incondicional me enseñaron que la verdadera fortaleza no se mide en los logros alcanzados, sino en la capacidad de levantarse después de cada caída. Gracias por ser mi guía, por sus palabras de aliento en los momentos de duda y por su ejemplo de perseverancia que me inspira cada día.

A mis hermanos Heber Sallum Ramírez Salazar, Arnold Israel Ramírez Salazar y Eder Joab Ramírez Salazar, que con su esfuerzo silencioso y sus propios sacrificios me enseñaron que la verdadera grandeza no está en lo que uno recibe, sino en lo que se entrega por amor. Ellos renunciaron a comodidades, compartieron sus triunfos y soportaron sus propias batallas para que yo pudiera avanzar con más firmeza. En cada gesto de apoyo encontré un recordatorio de que la superación no es un camino solitario, sino un viaje compartido donde el sacrificio se convierte en fuerza y la unión en esperanza. Gracias por demostrarme que la resiliencia se hereda, que la lucha se comparte y que el amor fraternal es una fuente inagotable de inspiración.

A mí mismo, por haber resistido cuando las fuerzas parecían agotarse y el camino se tornaba incierto. Por cada noche de desvelo, cada renuncia silenciosa y cada batalla interna que me exigió más de lo que creí tener. Por los sacrificios que me enseñaron que el verdadero valor no está en lo que se pierde, sino en lo que se gana al mantenerse firme. Por haber transformado las dudas en aprendizajes y el cansancio en impulso. Hoy me agradezco la valentía de no rendirme, la disciplina de continuar y la esperanza que me sostuvo en los momentos más oscuros. Este logro es testimonio de que la perseverancia abre puertas, que los sacrificios construyen cimientos y que la esperanza, cuando se abraza con el corazón, se convierte en la luz que guía hacia adelante.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios, quien ha sido mi guía y mi fuerza en cada paso de este camino. En los momentos de cansancio me dio aliento, en las dudas me regaló claridad y en las caídas me levantó con esperanza. Este logro es reflejo de Su infinita bondad y de la fe que me sostuvo cuando parecía imposible continuar.

A mi asesor de tesis, Luis Abraham Chaparro Encinas por su paciencia y dedicación, por cada consejo que me ayudó a transformar la incertidumbre en certeza y por su compromiso en guiarme hacia la superación. Su apoyo fue más que académico: fue un impulso constante que me recordó que los sacrificios tienen sentido cuando se persiguen con pasión y disciplina.

A mis maestros de carrera, quienes con su entrega y vocación sembraron en mí el deseo de aprender y la convicción de que el conocimiento es una herramienta poderosa para alcanzar sueños. Cada enseñanza recibida fue un peldaño en este camino de esfuerzo, y cada palabra de aliento se convirtió en esperanza para seguir adelante.

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO.....	ii
ÍNDICE.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABLAS	vi
RESUMEN	vii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	3
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos	3
1.2 HIPÓTESIS.....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 El chiltepín	5
2.1.1 Filogenia y origen.....	5
2.1.2 Producción y recolección silvestre del chile chiltepín (<i>capsicum annuum var. glabriusculum</i>)	6
Producción y rendimiento; Invernadero: hasta 2,069.76 kg/ha. Rodales de mezquite: 161.61 kg/ha (Espinoza, 2020).	7
2.1.3 Importancia socioeconómica del chiltepín	8
2.1.4 Importancia en la conservación y el uso sostenible.....	9
2.1.5 POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO Y CIENTÍFICO DEL CHILTEPÍN.....	10
2.2 SEED PRIMING	12
2.2.1 Conceptos generales	12
2.2.2 MÉTODOS DE SEED PRIMING	13
2.3 Uso de vermicomposta	15
2.4 Seed priming en chiltepín.....	15
2.5 Investigaciones realizadas de seed priming en chiltepín	16
3. MATERIALES Y MÉTODOS	17

3.1 Enfoque y diseño experimental	17
3.2 Material vegetal.....	17
3.3 Preparación y aplicación de tratamientos	17
3.4 Condiciones de germinación	18
3.5 VARIABLES EVALUADAS	18
3.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	19
4. RESULTADOS	20
4.1. Germinación de semillas de chiltepín bajo diferentes tratamientos.....	20
4.2. VIGOR DE PLÁNTULAS.....	21
4.3. INCIDENCIA DE HONGOS FITOPATÓGENOS	22
4.4. ALTURA DE PLÁNTULAS	23
5. DISCUSIÓN.....	24
6. CONCLUSIONES	26
7. LITERATURA CITADA	28

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1** Esquema Filogenético Del Género "*Capsicum Annum var. Glabriusculum*"6
- Figura 2** Efecto de los tratamientos de priming en el porcentaje de germinación de semillas de chiltepín (*Capsicum annum* subsp. *Glabriusculum*) las barras representan el promedio \pm ES (n=3). * indican diferencia significativa ($p < 0.05$) en la prueba de Tukey HSD.....20
- Figura 3** Índice de vigor de plántulas de chiltepín (*Capsicum annum* subsp. *glabriusculum*) sometidas a distintos tratamientos de priming. Las barras muestran el promedio \pm ES (n = 3). Se observan diferencias significativas entre los tratamientos, indicadas mediante asteriscos, según la prueba de Tukey HSD ($p < 0.05$).21
- Figura 4** Efecto de los tratamientos de priming en la incidencia de hongos en semillas de chiltepín (*Capsicum annum* subsp. *glabriusculum*). Las barras representan el promedio \pm ES (n = 3). Los asteriscos indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de Tukey HSD ($p < 0.05$).22
- Figura 5** Efecto de los tratamientos de priming en la altura de plántulas de chiltepín (*Capsicum annum* subsp. *glabriusculum*). Las barras representan el promedio \pm ES (n = 3). Los asteriscos indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de Tukey HSD ($p < 0.05$).23

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Recolección de chiltepín a nivel nacional	7
Tabla 2 Revisión de estudios relacionados al cultivo de chiltepín usando los métodos de seed priming	16
Tabla 3 Descripción de tratamientos	19

RESUMEN

El presente estudio aborda la problemática de la baja germinación y la alta incidencia de hongos fitopatógenos en semillas de chiltepín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*), especie de gran relevancia ecológica, cultural y económica en el norte de México. Con el propósito de mejorar la germinación, el vigor y la sanidad de las plántulas, se evaluó el efecto del lixiviado de lombricompost y de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO), aplicados de manera individual y combinada. Se establecieron cuatro tratamientos: control, lixiviado, ZnO aislado y la combinación de ambos. Las variables analizadas fueron porcentaje de germinación, índice de vigor, altura de plántulas e incidencia de hongos, utilizando análisis estadístico (ANOVA y Tukey). Los resultados mostraron diferencias significativas. El lixiviado de lombricompost fue el más eficaz, alcanzando 62% de germinación, mayor vigor y altura promedio, además de eliminar la incidencia de hongos. La combinación de lixiviado + ZnO presentó valores intermedios, mientras que el ZnO aislado mostró baja germinación y alta presencia de patógenos. El control no registró germinación y presentó 100% de incidencia de hongos. En conclusión, el lixiviado de lombricompost se confirma como un bioinsumo efectivo para la propagación del chiltepín, mientras que las nanopartículas de zinc requieren optimización para generar efectos consistentes. Estos hallazgos refuerzan la importancia de integrar bioinsumos agroecológicos con nanotecnología agrícola en estrategias sustentables de conservación y producción.

Palabras clave: ZnO, Lixiviado, Nanopartícula, Lombricompost, Anova

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura contemporánea se encuentra en una encrucijada entre la necesidad de aumentar la productividad y la urgencia de adoptar prácticas sostenibles que reduzcan el impacto ambiental. En este escenario, el uso de bioinsumos y tecnologías emergentes como la nanotecnología ha ganado terreno como alternativa viable para mejorar el rendimiento de los cultivos, fortalecer su resistencia a enfermedades y reducir la dependencia de agroquímicos sintéticos (Rosales et al., 2025).

Uno de los bioinsumos más prometedores es el lixiviado de lombricompost, un subproducto líquido del proceso de vermicompostaje que contiene una alta concentración de microorganismos benéficos, enzimas, hormonas vegetales y nutrientes esenciales. Diversos estudios han demostrado que este lixiviado puede estimular la germinación, mejorar el vigor de las plántulas y reducir la incidencia de patógenos, gracias a su capacidad para inducir respuestas de defensa en las plantas y mejorar la salud del suelo (Alcívar et al., 2021).

Por otro lado, las nanopartículas de zinc (ZnO) representan una innovación tecnológica con aplicaciones crecientes en la agricultura. Su tamaño nanométrico les confiere propiedades únicas, como una mayor superficie de contacto y reactividad, lo que permite una mejor absorción por las plantas. El zinc es un micronutriente esencial involucrado en procesos fisiológicos clave como la síntesis de proteínas, la regulación hormonal y la defensa contra el estrés oxidativo. La aplicación de nanopartículas de zinc ha mostrado efectos positivos en la germinación, el crecimiento radicular y la resistencia a enfermedades en diversos cultivos, aunque su uso en especies nativas aún es incipiente (Pérez et al., 2025).

En este contexto, el chiltepín (*Capsicum annuum var. glabriusculum*) se presenta como una especie de alto valor ecológico, cultural y económico. Originario del norte de México, el chiltepín es considerado el ancestro silvestre de los chiles domesticados y posee características únicas como su alta pungencia, rusticidad y adaptabilidad a condiciones adversas. Sin embargo, su propagación enfrenta limitaciones debido a la baja tasa de

germinación, el débil vigor inicial y la susceptibilidad a hongos fitopatógenos que afectan las semillas y plántulas en sus primeras etapas de desarrollo (Araiza et al., 2011).

La presente investigación tiene como objetivo evaluar el efecto del lixiviado de lombricompost y las nanopartículas de zinc en la germinación, el vigor y la incidencia de hongos fitopatógenos en semillas de chiltepín. Se plantea que la combinación de estos tratamientos puede generar sinergias que mejoren la calidad fisiológica de las plántulas y fortalezcan su resistencia a patógenos, contribuyendo así a un manejo más eficiente y sostenible del cultivo.

Este estudio busca aportar evidencia científica sobre el uso combinado de bioinsumos y nanotecnología en cultivos nativos, promoviendo prácticas agroecológicas que favorezcan la conservación de la biodiversidad, el aprovechamiento de recursos locales y la resiliencia de los sistemas agrícolas. Los resultados podrían sentar las bases para el desarrollo de estrategias de producción más sustentables y replicables en otras especies de interés regional.

1.1 OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el efecto del lixiviado de lombriz y de las nanopartículas de zinc en la germinación, el vigor y la fitosanidad de semillas y plántulas de chiltepín (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*).

Objetivos específicos

1. Seleccionar semillas de chiltepín aptas mediante criterios morfológicos y sanitarios, descartando aquellas no viables, utilizando semilla de uso comercial del estado de Sonora.
2. Diseñar y formular los tratamientos a base de lixiviado de lombriz (proveniente de estiércol bovino), nanopartículas de zinc y su combinación.
3. Comparar el efecto de los tratamientos en parámetros relacionados con la germinación, vigor, altura e incidencia de hongos.

1.2 HIPÓTESIS

La aplicación de lixiviado de lombricompost y nanopartículas de zinc mejora significativamente la germinación, el vigor y la resistencia a hongos fitopatógenos en semillas de chiltepín.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El chiltepín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*) es una especie silvestre de gran relevancia ecológica y cultural en México. Sin embargo, enfrenta problemas de baja germinación y presión antropogénica debido a la sobreexplotación y prácticas de manejo inadecuadas, lo que amenaza su conservación y aprovechamiento productivo. Estudios recientes señalan que la limitada viabilidad de sus semillas y la creciente demanda del fruto podrían comprometer la permanencia de la especie en el corto plazo. (Burboa et al., 2015)

El uso de bioinsumos como el lixiviado de lombricompost representa una alternativa sostenible para mejorar la germinación y vigor de las plántulas. Este extracto líquido contiene nutrientes solubles, sustancias húmicas y microorganismos benéficos que favorecen la sanidad vegetal y estimulan procesos fisiológicos esenciales.

Investigaciones recientes han demostrado que su aplicación incrementa el rendimiento y calidad de cultivos hortícolas, además de reducir la incidencia de patógenos, lo que lo convierte en una herramienta clave para la agricultura sustentable. (García et al, 2025).

Por otro lado, las nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) han emergido como una innovación tecnológica con aplicaciones directas en la agricultura. El zinc es un micronutriente esencial en la síntesis de proteínas y en la defensa antioxidante de las plantas. En su forma nano, presenta mayor biodisponibilidad y capacidad de penetración celular, lo que se traduce en mejoras en germinación, crecimiento radicular y resistencia frente a hongos fitopatógenos. Investigaciones recientes en lechuga y tomate han mostrado incrementos significativos en rendimiento y sanidad vegetal tras su aplicación (Hernández et al., 2024).

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El chiltepín

El chiltepín es una especie nativa de América que se distribuye ampliamente en México, desde el sur de los Estados Unidos hasta América central (Ramírez. O, 2017).

En México se encuentra en diversas regiones, principalmente en zonas áridas y semiáridas. Estados con presencia de chiltepín: Sonora: se han identificado grandes poblaciones silvestres de chiltepín, Sinaloa: se han realizado intentos de cultivo comercial. Chihuahua: En la región de la sierra se han documentado poblaciones silvestres. Durango: baja presencia de chiltepín silvestre. Veracruz: en la región huasteca.

Oaxaca: en zonas altas (CONABIO, 2016).

2.1.1 Filogenia y origen

El chiltepín es considerado el progenitor silvestre de las variedades cultivadas de *Capsicum annuum*, como el jalapeño, serrano, poblano y morrón Chile silvestre. (Hernández et al, 2012). Estudios filogenéticos han demostrado que *C. annuum* var. *Glabriusculum* es la fuente genética de la que derivan las variedades domesticas del chile.

Investigación reciente, ha caracterizado la diversidad genética del chiltepín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*) mediante el uso de marcadores moleculares, secuenciación de ADN y análisis de polimorfismos, lo que ha permitido confirmar su alta variabilidad y su papel como ancestro directo de variedades domesticadas. Estos estudios han mostrado que las poblaciones silvestres conservan una riqueza genética superior a la de los cultivos comerciales, aportando información clave sobre su relación evolutiva y su potencial como recurso estratégico para programas de conservación y mejoramiento agrícola (Martínez 2023).

Figura 1 Esquema Filogenético Del Género "*Capsicum Annum var. Glabriusculum*"

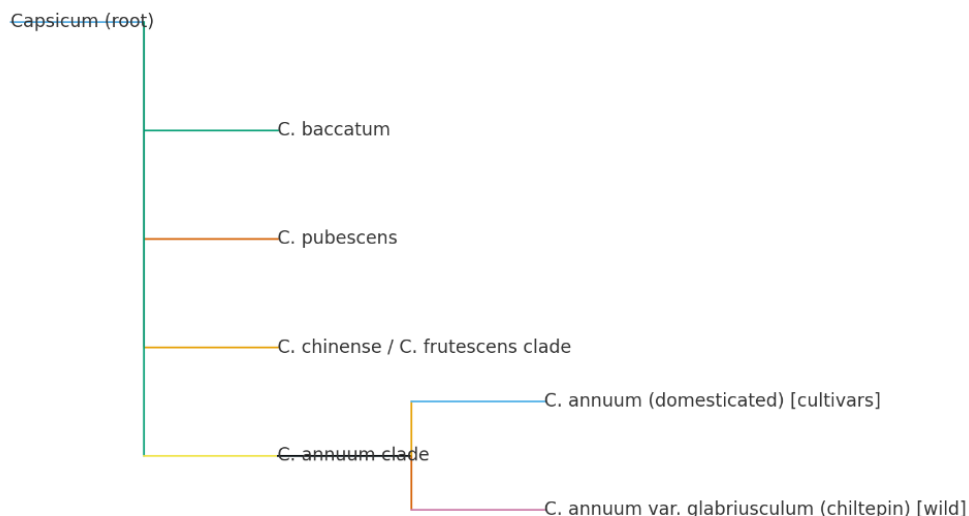


Figura 1. Árbol filogenético del género *Capsicum*, mostrando las relaciones evolutivas entre especies domesticadas y silvestres. Se destaca la posición de *Capsicum annum var. glabriusculum* (chiltepin) como progenitor silvestre de variedades cultivadas como jalapeño, serrano y poblano (Qin, 2014).

2.1.2 Producción y recolección silvestre del chile chiltepin (*Capsicum annum var. glabriusculum*)

El chiltepin es un recurso silvestre de alto valor económico y cultural en el noroeste de México; en Sonora se le conoce como el "*oro rojo del desierto*", debido a su intenso color y al elevado precio en el mercado, que varía entre 600 y 1000 MXN/kg según su calidad, presentación y temporada de cosecha (Kraft, et al., 2014).

Su valor se relaciona con su disponibilidad limitada, las condiciones agrestes de su hábitat y su creciente demanda en Estados Unidos y otros países interesados en productos exóticos y de origen silvestre, donde se ha posicionado como ingrediente gourmet.

El chiltepin se caracteriza por un picor intenso y breve, con notas ahumadas y ligeramente cítricas. Este perfil sensorial lo vuelve un ingrediente altamente apreciado en:

- Salsas artesanales frescas o deshidratadas
- Moles y adobos tradicionales
- Polvos y escamas deshidratadas de alto valor agregado
- Aceites infusionados y preparaciones innovadoras

Su carácter silvestre y la recolección manual agregan valor simbólico, ya que representan prácticas tradicionales, vínculos comunitarios y narrativas de origen que facilitan su ingreso a mercados gourmet, orgánicos y de comercio justo.

A continuación, se muestra una tabla de recolección de los principales estados que recolectan chiltepín (Tabla 1).

Tabla 1 Recolección de chiltepín a nivel nacional

Estado	Recolección	Riesgo de Extinción Local	Referencias
Sonora	Alta	Moderado (por sobre-recolección)	Kraft et al., 2014
Sinaloa	Media–Alta	Moderado	CONAFOR
Baja California Sur	Media	Bajo–Moderado	Hayano-Kanashiro et al., 2016
Chihuahua	Local	Moderado–Alto	CIAD e INIFAP
Veracruz	Presente	Bajo	CONABIO
Oaxaca	Presente	Bajo–Moderado	CONABIO
Chiapas	Presente	Moderado	CONABIO

Producción y rendimiento; Invernadero: hasta 2,069.76 kg/ha. Rodales de mezquite: 161.61 kg/ha

(Espinoza, 2020).

En la cuenca del Río Sonora, la recolección de chiltepín constituye una actividad estratégica para la economía local: tan solo en la temporada 2011 participaron alrededor de 500 recolectores, quienes obtuvieron 45 toneladas de fruto silvestre. Con un precio promedio local de \$1,750 MXN/kg, esta cosecha generó una derrama de ≈\$78 millones de pesos; no obstante, en el mercado final el producto alcanzó \$2,800 MXN/kg, elevando la derrama económica a ≈\$126 millones, lo cual evidencia márgenes de apropiación por intermediarios y la necesidad de fortalecer las capacidades de organización y comercialización de los recolectores. (Puebla-Gutiérrez, 2013).

2.1.3 Importancia socioeconómica del chiltepín

La recolección y comercialización del chiltepín representan una oportunidad económica significativa para comunidades rurales de zonas áridas, ya que puede complementarse con actividades agrícolas y promover el emprendimiento local si se maneja bajo esquemas sustentables.

La recolección silvestre del chiltepín constituye una actividad estacional de gran relevancia económica para numerosas familias rurales e indígenas del noroeste de México. Esta práctica, que se lleva a cabo principalmente entre los meses de septiembre y noviembre, representa en muchos casos la principal fuente de ingresos durante el último trimestre del año, especialmente en comunidades con escasas alternativas laborales (Kraft, 2014). En años de buena producción, el chiltepín puede convertirse en un recurso estratégico para la subsistencia familiar, debido a su alto valor en el mercado y a la creciente demanda tanto nacional como internacional (Kraft et al., 2014)

Uno de los aspectos más destacados de esta actividad es su accesibilidad. La recolección, selección, secado y empaque del fruto involucra a diversos sectores de la población, incluyendo mujeres, adultos mayores, jóvenes y niños. Esta participación amplia fortalece la cohesión comunitaria, fomenta la equidad en la distribución de tareas y genera ingresos que benefician directamente a grupos socialmente vulnerables. Además, el carácter tradicional de la actividad y su vínculo con el entorno natural refuerzan los lazos culturales y el sentido de pertenencia entre los habitantes de las regiones productoras (Martínez, 2023).

En algunas comunidades, la recolección silvestre ha evolucionado hacia esquemas organizados, mediante la conformación de cooperativas locales. Estas organizaciones permiten regular los precios de venta, reducir la dependencia de intermediarios y acceder a apoyos institucionales para mejorar las condiciones de producción y comercialización. Paralelamente, se han desarrollado proyectos de cultivo bajo riego que incorporan prácticas agroecológicas, lo que ha permitido generar una oferta más estable, crear empleos permanentes y abrir canales hacia mercados especializados, como el gourmet, el orgánico y el de comercio justo.

Las consecuencias positivas de este proceso de organización y tecnificación son múltiples. Entre ellas destacan la disminución de la migración rural, al ofrecer alternativas económicas viables en el lugar de origen; el fortalecimiento de la soberanía alimentaria, al promover el cultivo y consumo de especies nativas; el impulso a emprendimientos locales, que dinamizan las economías regionales; y la conservación de los ecosistemas áridos y semiáridos, gracias a un manejo sustentable del recurso. En conjunto, el chiltepín no solo representa un producto de alto valor comercial, sino también una herramienta para el desarrollo rural integral y la preservación del patrimonio biocultural de México (Anchondo-Aguilar, 2024).

2.1.4 Importancia en la conservación y el uso sostenible

El chiltepín es clave para la conservación de ecosistemas áridos y semiáridos. Su valor económico ha incentivado a comunidades y autoridades a proteger los hábitats silvestres, ya que la pérdida del recurso impactaría directamente sus ingresos, por tanto, se han adoptado estrategias como: Recolección selectiva, Protección de plantas madre, Monitoreo comunitario para establecer límites de cosecha, Programas de CONAFOR orientados al manejo y restauración (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 2022; CONAFOR, 2013).

Las prácticas de manejo sustentable aplicadas al chiltepín han buscado equilibrar la conservación del recurso con su aprovechamiento económico y cultural. Una de las estrategias más relevantes es la recolección selectiva, que consiste en cosechar únicamente los frutos maduros y en buen estado, evitando dañar las plantas jóvenes o extraer de manera indiscriminada. Esta técnica permite mantener la capacidad reproductiva de las poblaciones silvestres y asegurar su regeneración natural. (Molina et al., 2009).

Otra medida fundamental es la protección de las plantas madre, es decir, aquellas que presentan mayor vigor, productividad o adaptabilidad. Al conservar estos ejemplares, se garantiza la permanencia de individuos con alto valor genético y se fortalece la resiliencia de las poblaciones frente a condiciones ambientales adversas.

El monitoreo comunitario del chiltepín involucra a los propios recolectores en la vigilancia de los rodales silvestres y en la definición de reglas locales como límites de cosecha y periodos de descanso para prevenir la sobreexplotación y asegurar la regeneración natural; estos arreglos, alineados con manuales técnicos y experiencias territoriales en Sonora y el noroeste de México, han probado ser compatibles con el aprovechamiento económico y la conservación del recurso (Molina-Maldonado, Morales-Cuen, & Márquez-Castillo, 2009; Flores-Márgez, 2022). Además, los estudios de organización local y comercialización muestran que cuando las comunidades acuerdan reglas claras y mecanismos de seguimiento, se fortalece la cohesión social y se mejora la distribución equitativa de beneficios entre unidades productivas y recolectores (Anchondo-Aguilar, González-Aldana, Luján-Aguirre, & Piña-Ramírez, 2024). Desde la política pública, se reconoce el valor biocultural del chiltepín y la pertinencia de esquemas participativos para su preservación, lo que refuerza el sentido de responsabilidad compartida hacia el recurso (Dirección General de SIAP, 2023).

El empleo de bioinsumos en particular los lixiviados de vermicomposta se ha consolidado como una alternativa para mejorar la fertilidad del suelo, reducir el uso de agroquímicos y avanzar en la transición agroecológica, con efectos positivos sobre la nutrición vegetal y la sanidad del cultivo (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SADER], 2022; Villegas-Cornelio & Laines Canepa, 2017). En México, esta adopción se impulsa mediante estrategias de capacitación comunitaria talleres, manuales prácticos y acompañamiento técnico que permiten a productores elaborar y aplicar bioinsumos soberanos (por ejemplo, el lixiviado de lombriz) con procedimientos estandarizados y bitácoras de seguimiento (SADER–EAT, 2022). A la par, programas y campañas coordinados por instituciones públicas y redes de investigación fomentan procesos educativos participativos, fortalecen la organización local y la preservación de conocimientos tradicionales asociados al manejo de cultivos nativos como el chiltepín, articulando la conservación del recurso con su aprovechamiento cultural y productivo (CIAD, 2025; CONAHCYT, 2024).

2.1.5 POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO Y CIENTÍFICO DEL CHILTEPÍN

El chiltepín como pariente silvestre de los chiles domesticados, constituye un reservorio genético de gran valor para la agricultura y la investigación científica. Su diversidad genética se refleja en altos niveles de variabilidad que le confieren resistencia frente a

plagas como *Phytophthora*, *Thrips* y diversos virus, además de tolerancia a condiciones de sequía, calor y suelos pobres. Esta capacidad de adaptación a ambientes áridos lo convierte en una fuente estratégica para programas de mejoramiento genético y para el uso de herramientas modernas como la edición génica mediante CRISPR (Hayano et al., 2016).

Otro aspecto relevante es el contenido de capsaicinoides, principalmente capsaicina y dihidrocapsaicina, compuestos responsables de su pungencia y con reconocidas propiedades farmacológicas. Estos metabolitos secundarios poseen efectos analgésicos y antiinflamatorios, además de actividad antioxidante y anticancerígena, lo que les otorga un potencial significativo en el desarrollo de suplementos metabólicos y aplicaciones médicas (Hayano et al., 2016).

En el ámbito industrial, los extractos de chiltepín se emplean en la elaboración de aceites y salsas funcionales dentro de la industria alimentaria, en productos cosméticos naturales con efectos termogénicos, y en formulaciones farmacéuticas de liberación controlada. Estas aplicaciones demuestran la versatilidad de la especie y su capacidad para generar valor agregado en distintos sectores productivos (Hayano et al., 2016).

Las perspectivas de investigación sobre el chiltepín (*Capsicum annum* var. *glabriusculum*) son amplias: su condición de pariente silvestre y su alta diversidad genética lo posicionan como recurso prioritario para biotecnología y genómica funcional, con evidencia reciente de variación genómica (SNPs/InDels) útil para mapeo de rasgos y plataformas de mejoramiento de nueva generación, así como para el diseño de estrategias de edición génica y el estudio de bioactivos con aplicaciones nutracéuticas y médicas (Hayano-Kanashiro et al., 2016; ha-Contreras et al., 2024; Kraft et al., 2014). No obstante, el aprovechamiento sostenible enfrenta retos socioeconómicos: la sobreexplotación por la creciente demanda reduce la capacidad de regeneración de poblaciones silvestres y obliga a establecer prácticas de manejo y cosecha selectiva; a la par, la intermediación y el comercio informal—con baja trazabilidad y asimetrías de precio entre el pago local al recolector y el valor en mercado—limitan los beneficios

comunitarios y la formalización de cadenas de valor (Molina-Maldonado et al., 2009; Puebla-Gutiérrez, 2013; Anchondo-Aguilar et al., 2024; SIAP, 2023).

Otro desafío crítico es la escasa asistencia técnica disponible para las comunidades productoras de chiltepín, lo que limita la capacitación en manejo, postcosecha y comercialización y, en consecuencia, restringe la mejora de la calidad y el acceso a mercados especializados (Puebla-Gutiérrez, 2013; Molina-Maldonado et al., 2009). A ello se suma la ausencia de regulación efectiva y de mecanismos de certificación, que dificultan la trazabilidad y la implementación de políticas de conservación, comprometiendo tanto la sostenibilidad del recurso como la equidad en su aprovechamiento (Anchondo-Aguilar et al., 2024; Dirección General de SIAP, 2023). En conjunto, estas limitantes evidencian la urgencia de estrategias integrales que articulen investigación científica, políticas públicas y participación comunitaria, a fin de garantizar la conservación del chiltepín y potenciar su valor biotecnológico, económico y cultural (Molina-Maldonado et al., 2009; Puebla-Gutiérrez, 2013; Anchondo-Aguilar et al., 2024; Dirección General de SIAP, 2023).

2.2 SEED PRIMING

2.2.1 Conceptos generales

El seed priming es una técnica pregerminativa que consiste en hidratar las semillas de manera controlada para activar procesos metabólicos iniciales sin permitir la emergencia de la radícula; en otras palabras, “prepara” a la semilla para que, al colocarse en condiciones de germinación, responda más rápido, con mayor uniformidad y mejor vigor (Paparella et al., 2015; Quintero Castellanos et al., 2018; Devika et al. 2021).

Su objetivo es mejorar la calidad fisiológica de las semillas y aumentar la tolerancia frente a condiciones adversas como sequía, salinidad, temperaturas extremas o incluso presencia de patógenos, beneficios ampliamente documentados en la literatura de fisiología de semillas y verificados en especies de *Capsicum* (Ibrahim, 2016; Quintero Castellanos et al., 2018).

Durante el priming, la semilla inicia procesos como la síntesis de enzimas, la reparación de membranas y la activación de mecanismos de defensa, pero el tratamiento se

interrumpe antes de la germinación visible, de modo que al rehidratarse completamente la semilla reduce el tiempo de latencia, acelera y uniforma la emergencia (Paparella et al., 2015; Coronel & Silva, 2023).

En el caso de chiles silvestres como chiltepín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*), se ha demostrado que técnicas de halo-priming (p. ej., KNO_3 , NH_4NO_3) y reguladores (GA_3) mejoran el desempeño germinativo, al aliviar la dormancia, elevar el porcentaje de germinación y aumentar el vigor, confirmando la utilidad del priming como herramienta para establecimiento rápido y homogéneo del cultivo (Quintero Castellanos et al., 2018)

2.2.2 MÉTODOS DE SEED PRIMING

Hidropriming

El hidropriming es el método más simple y difundido: consiste en hidratar las semillas únicamente con agua durante un periodo controlado para activar el metabolismo pregerminativo sin permitir la protrusión de la radícula, con lo cual se acelera y uniformiza la germinación y se mejora el vigor del lote; además, por su bajo costo y facilidad de implementación, resulta especialmente accesible para hortalizas y cereales (Paparella et al., 2015; Rhaman, 2025).

Osmopriming.

El osmopriming emplea soluciones osmóticas (p. ej., PEG o sales minerales) para modular la imbibición; al limitar la sobrehidratación, se evita la germinación prematura y se promueve una activación controlada de los procesos fisiológicos. En general, mejora la uniformidad de emergencia y aumenta la tolerancia de plántulas frente a sequía y salinidad (Paparella et al., 2015; Ibrahim, 2016). Una guía técnica aplicada al sector semillas resume que el osmopriming forma parte de las tres técnicas estándar de priming de uso comercial

Halopriming.

El halopriming se basa en soluciones salinas (p. ej., NaCl , KCl , CaCl_2), que inducen ajustes osmóticos y respuestas de defensa frente al estrés salino, elevando la capacidad

de germinación y el vigor en ambientes con alta salinidad. En Chile piquín / chiltepín se ha demostrado que halopriming con nitratos (KNO_3 , NH_4NO_3) mejora la germinación y uniformidad; además, combinaciones con GA_3 optimizan el desempeño (Quintero Castellanos et al., 2018). En *Capsicum annuum* también se han evaluado gradientes de NaCl con y sin GA_3 , confirmando efectos significativos sobre germinación y crecimiento inicial (Couch-Uicab et al., 2025).

Hormonalpriming

El hormonal priming utiliza fitohormonas como GA_3 , SA, ABA o jasmonatos para modular procesos específicos: GA_3 contribuye a romper latencia y acelerar la germinación; SA y JA fortalecen respuestas de defensa y la tolerancia frente a estrés abiótico y biótico; mientras que ABA participa en la adaptación a sequía y en la regulación fina del inicio de la germinación. Revisiones recientes resumen el papel mitigador de las fitohormonas vía priming y el crosstalk hormonal que integra GA-ABA-JA/SA durante la germinación y el establecimiento (Rhaman et al., 2021; Pan et al., 2023; Verma et al., 2025)

Biopriming.

El biopriming consiste en inocular la semilla con microorganismos benéficos (p. ej., *Bacillus spp.*, Trichoderma, hongos micorrízicos arbusculares), lo que mejora germinación y vigor y activa respuestas de defensa sistémica, reduciendo la incidencia de enfermedades y la dependencia de agroquímicos. En chiltepín, el uso de *Bacillus spp.* nativos ha mejorado parámetros de germinación y tolerancia a sequía, además de rasgos de crecimiento inicial en condiciones controladas y de invernadero (Mendoza-Alatorre et al., 2024); de manera general, revisiones recientes describen la base fisiológica y molecular por la que el priming (incluido el bio-) induce memoria de estrés y tolerancia cruzada (Jatana et al., 2024).

Nanopriming.

El nanopriming es una innovación emergente que utiliza nanopartículas (p. ej., ZnO, SiO_2 , TiO_2) a bajas concentraciones para mejorar la imbibición, modular ROS y reforzar sistemas antioxidantes; con ello se incrementan germinación y vigor, y se mejora la tolerancia a sequía, calor o salinidad. En jalapeño (*Capsicum annuum*), el nanopriming

con ZnO y SiO₂ elevó germinación, vigor, acumulación de prolina y capacidad antioxidante, con ganancias superiores al hidropriming bajo estrés osmótico (Ochoa-Chaparro et al., 2025). Revisiones recientes confirman el potencial de ZnO-NPs u otros óxidos en priming de semillas, destacando la necesidad de dosis y tamaños controlados (Donia & Carbone, 2023; Ghosh et al., 2024; Galindo-Guzmán et al. 2022). Asimismo, existen evidencias con TiO₂-NPs que mejoran vigor y enzimas antioxidantes bajo salinidad en especies modelo (Yagız & Çalışkan, 2024) y estudios mecanísticos que explican vías hormonales y antioxidantes implicadas (Imtiaz et al., 2023; Nile et al., 2022).

2.3 Uso de vermicomposta

El **priming con vermicomposta**, también conocido como *biopriming con lixiviado de lombricompost*, es una técnica de acondicionamiento de semillas que utiliza extractos líquidos obtenidos del proceso de vermicompostaje para mejorar la germinación, el vigor y la tolerancia al estrés de las plántulas. Este método forma parte de los enfoques agroecológicos que buscan reducir el uso de agroquímicos y promover la salud del suelo y de las plantas desde las primeras etapas del desarrollo (Muhie et al., 2020; Kamatchi Kala et al., 2018).

2.4 Seed priming en chiltepín

Aunque los estudios específicos en chiltepín son todavía escasos, la evidencia generada en *Capsicum* spp., particularmente en chiles silvestres como *Capsicum annuum* var. *glabriusculum*, demuestra que el seed priming puede reducir el tiempo medio de germinación, incrementar la uniformidad de emergencia y mejorar la supervivencia inicial de las plántulas. En México, investigaciones con semillas de chile piquín han mostrado que tratamientos como el halopriming (KNO₃, NH₄NO₃) y el hormonal priming con GA₃ aceleran la emergencia y mejoran el vigor al aliviar la dormancia y sincronizar la germinación (Quintero Castellanos et al., 2018). Asimismo, evaluaciones recientes en *Capsicum annuum* bajo condiciones de estrés, incluyendo sequía y salinidad, confirman que el priming mejora la tolerancia inicial, favorece el establecimiento y aumenta la calidad fisiológica de las plántulas, lo cual es especialmente relevante para programas de domesticación y producción de chiltepín (Ochoa-Chaparro et al., 2025).

2.5 Investigaciones realizadas de seed priming en chiltepín

A continuación, se presentan los principales estudios realizados sobre seed priming en el cultivo de Chiltepín, resumidos en un cuadro comparativo con los tratamientos aplicados, objetivos y principales hallazgos. Este documento puede ser utilizado como referencia para tesis o trabajos de investigación.

Tabla 2 Revisión de estudios relacionados al cultivo de chiltepín usando los métodos de seed priming

Estudio	Tratamientos de Priming	Objetivo Principal	Resultados Clave
Quintero, 2018	Halopriming con KNO ₃ , NH ₄ NO ₃ ; GA ₃ (100 y 200 ppm); Digestión ácida (HCl + H ₂ O ₂)	Evaluar técnicas para aliviar la latencia y mejorar la germinación del piquín	Halopriming con KNO ₃ a -10 a -15 atm y GA ₃ aumentaron germinación y uniformidad; la digestión ácida redujo la germinación.
López-Pérez, 2023	Extracto acuoso de biochar de cáscara de coco	Evaluar el efecto de biochar en la germinación y crecimiento temprano	Biochar aumentó la germinación y crecimiento de plántulas; se sugiere como alternativa ecológica.
Couoh-Uicab, 2025	GA ₃ (100–450 mg/L); NaCl (100–450 mM); Combinación NaCl + GA ₃	Evaluar el efecto de GA ₃ y NaCl en la germinación del piquín	Combinación de NaCl y GA ₃ mejoró significativamente la germinación; se recomienda para programas de producción de plántulas.
Alcalá-Rico, 2019	Peróxido de hidrogeno, Acido giberélico, Agromil, Ácido clorhídrico, nitrato de potasio, agua caliente, escarificación mecánica	Evaluar el potencial fisiológico de semillas de piquín	Identificaron mecanismos de latencia natural en semillas de piquín; sugieren importancia en programas de domesticación.
Mendoza-Alatorre, 2024	Bacillus spp. nativos	Evaluar la tolerancia a la sequía y promoción del crecimiento	Bacillus spp. aumentó la tolerancia a la sequía y promovió el crecimiento; útil para programas de domesticación.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Enfoque y diseño experimental

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, experimental y explicativo, con el propósito de evaluar el efecto del lixiviado de lombricompost y las nanopartículas de zinc sobre la germinación, el vigor y la incidencia de hongos fitopatógenos en semillas de chiltepín (*Capsicum annuum var. glabriusculum*). Se empleó un diseño completamente aleatorizado con arreglo factorial, considerando cuatro tratamientos principales: control (sin aplicación), lixiviado de lombricompost, nanopartículas de zinc, y la combinación de ambos. Cada tratamiento fue replicado tres veces, utilizando 50 semillas por unidad experimental, para garantizar la validez estadística de los resultados.

Este diseño permitió analizar los efectos individuales y sinérgicos de los tratamientos sobre variables fisiológicas y fitopatológicas, en concordancia con los objetivos específicos planteados. La elección de este enfoque responde a la necesidad de generar evidencia empírica que sustente el uso de bioinsumos y nanotecnología como herramientas sostenibles en el manejo de cultivos nativos.

3.2 Material vegetal

Las semillas de chiltepín utilizadas en el estudio fueron recolectadas en el estado de Sonora, seleccionadas por su integridad física y uniformidad. Previo a su uso, se sometieron a un proceso de selección de fértil sumergiendo las semillas en agua para identificar semillas vanas.

3.3 Preparación y aplicación de tratamientos

Lixiviado de lombricompost

El lixiviado fue obtenido a partir de un sistema de vermicompostaje con lombriz roja californiana (*Eisenia fetida*), alimentada con residuos vegetales y estiércol bovino. La aplicación se realizó mediante inmersión de las semillas en lixiviado durante 48 horas,

con el objetivo de estimular la germinación y activar mecanismos de defensa. Disolución de 5 ml de lixiviado en 500 ml de agua destilada.

Nanopartículas de zinc

Se preparó una suspensión acuosa a una concentración de 10 ppm o 10 mg/ litro de ZnCO₃ destilada, agitada por ultrasonido para asegurar su dispersión homogénea. Las semillas fueron tratadas por inmersión durante 48 horas, buscando mejorar la absorción de zinc y fortalecer la fisiología vegetal frente a estrés biótico.

Tratamiento combinado

En el tratamiento combinado, las semillas fueron sumergidas en lixiviado de lombricompost durante 48 horas, y posteriormente en la suspensión de ZnO durante 4 horas. Esta secuencia buscó evaluar posibles efectos sinérgicos entre ambos insumos. Constó de 5 ml de lixiviado+ 5 mg de ZnCO₃ disueltos en 500 ml de agua destilada

3.4 Condiciones de germinación

Las semillas tratadas fueron colocadas en cajas Petri con papel filtro humedecido con agua destilada estéril, y mantenidas en una cámara de germinación a 25 °C, con un fotoperiodo de 24 horas luz. La humedad se mantuvo constante mediante la adición periódica de agua destilada. El experimento tuvo una duración de 46 días, durante los cuales se registraron las variables fisiológicas y fitopatológicas.

3.5 VARIABLES EVALUADAS

Se evaluaron tres grupos de variables:

- **Germinación:** porcentaje de germinación. (N de semillas germinadas/ número total de semillas)
- **Vigor:** índice de vigor. (Altura promedio de plantas x porcentaje de germinación)
- **Incidencia de hongos fitopatógenos:** Los hongos no fueron identificados morfológicamente, sin embargo, se registró el porcentaje de infección por tratamiento. (N de semillas enfermas/ número de semillas totales) x100

- **Altura promedio** (sumatoria del total de plantas/el número de plantas)

3.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) para determinar diferencias significativas entre tratamientos. En caso de significancia, se aplicó una prueba de comparación de medias (Tukey, α 0.05).(Tabla 3)

Tabla 3 Descripción de tratamientos

Tratamiento 1= Lixiviado. 3 Repeticiones
Tratamiento 2= Lixiviado+ Zinc. 3 Repeticiones
Tratamiento 3= Zinc. 3 Repeticiones
Tratamiento 4= Control. 3 Repeticiones

La Tabla 3 presenta los cuatro tratamientos experimentales aplicados en el estudio, cada uno con tres repeticiones para asegurar la validez estadística y la reproducibilidad de los resultados. El Tratamiento 1 corresponde a la aplicación exclusiva de lixiviado de lombricomposta, mientras que el Tratamiento 2 combina lixiviado con zinc, con el fin de evaluar posibles efectos sinérgicos. El Tratamiento 3 incluye únicamente zinc como agente de priming, y el Tratamiento 4 funciona como control, sin recibir ningún tratamiento pregerminativo. Esta estructura experimental permite comparar de manera adecuada el impacto individual y combinado de los bioinsumos en las variables de germinación, vigor y establecimiento de plántulas.

4. RESULTADOS

4.1. Germinación de semillas de chiltepín bajo diferentes tratamientos

La germinación de las semillas de ¹chiltepín presentó diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. El **lixiviado de lombricompost** fue el tratamiento más efectivo, alcanzando un porcentaje de germinación de **62 ± 4%**, lo que representa un incremento notable respecto al control y a los demás tratamientos (Figura 2).

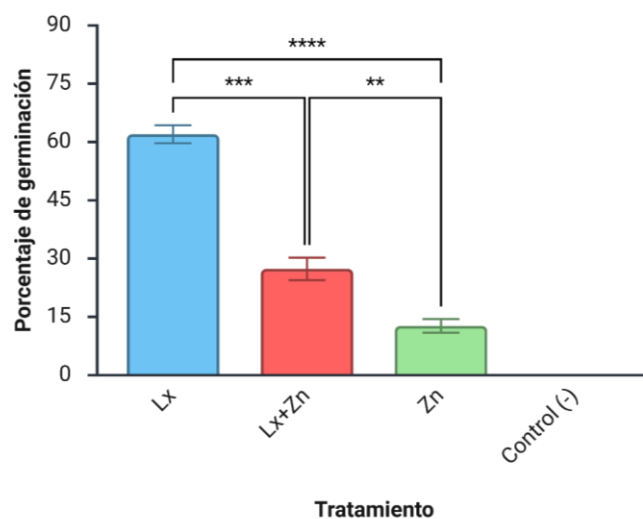


Figura 2 Efecto de los tratamientos de priming en el porcentaje de germinación de semillas de chiltepín (*Capsicum annum* subsp. *Glabriusculum*) las barras representan el promedio ± ES (n=3). * indican diferencia significativa ($p < 0.05$) en la prueba de Tukey HSD.

El tratamiento con **nanopartículas de zinc (ZnO) en combinación con lixiviado** se posicionó como el segundo mejor resultado, con una germinación de **27.33 ± 5.03%**, mostrando un efecto positivo, aunque menor en comparación con el bioinsumo orgánico aplicado de manera individual. Por su parte, el tratamiento con **ZnO aplicado de forma aislada** registró un porcentaje de germinación de **12.66 ± 3.06%**, evidenciando un efecto limitado en la emergencia de plántulas. Finalmente, el **tratamiento control** no presentó germinación (**0%**), confirmando la necesidad de insumos que favorezcan la viabilidad de las semillas.

4.2. VIGOR DE PLÁNTULAS

El índice de vigor, calculado mediante la fórmula altura \times porcentaje de germinación, mostró diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. Los bioinsumos tuvieron un efecto positivo en el desarrollo de las plántulas de chiltepín, destacando el lixiviado de lombricompost, que alcanzó el mayor valor con 8.86 ± 0.69 , evidenciando su capacidad para estimular tanto la germinación como el crecimiento inicial (Figura 3).

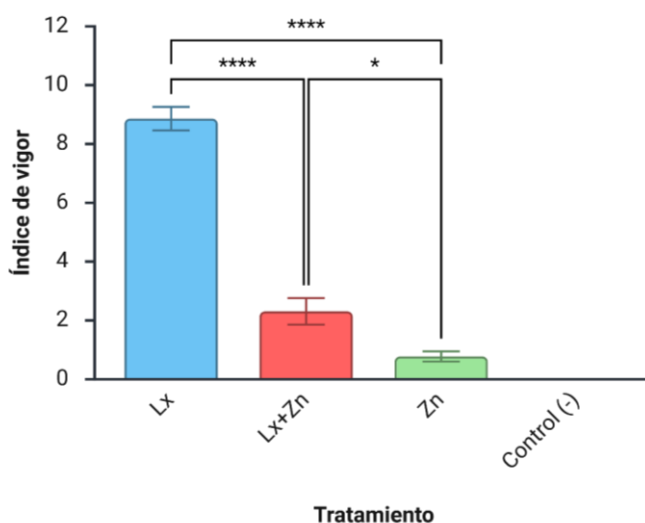


Figura 3 Índice de vigor de plántulas de chiltepín (*Capsicum annuum* subsp. *glabriusculum*) sometidas a distintos tratamientos de priming. Las barras muestran el promedio \pm ES ($n = 3$). Se observan diferencias significativas entre los tratamientos, indicadas mediante asteriscos, según la prueba de Tukey HSD ($p < 0.05$).

En segundo lugar, el tratamiento con nanopartículas de zinc (ZnO) en combinación con lixiviado registró un valor de 2.30 ± 0.78 , mostrando un efecto moderado en comparación con el bioinsumo aplicado de manera individual. El tratamiento con ZnO aislado obtuvo un índice de vigor de 0.77 ± 0.30 , reflejando un impacto limitado en la emergencia y desarrollo de las plántulas. Finalmente, el tratamiento control presentó un valor de 0, debido a la ausencia total de germinación.

Estos resultados confirman que el uso de bioinsumos, particularmente el lixiviado de lombricompost, representa una estrategia eficaz para mejorar el vigor de las plántulas de chiltepín, mientras que la aplicación exclusiva de nanopartículas de zinc muestra un efecto reducido.

4.3. INCIDENCIA DE HONGOS FITOPATÓGENOS

La incidencia de hongos en semillas y plántulas de chiltepín mostró diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. El lixiviado de lombricompost presentó el mejor desempeño, con un valor de 0%, lo que evidencia su efecto positivo en la supresión de fitopatógenos y su potencial como bioinsumo protector (Figura 4).

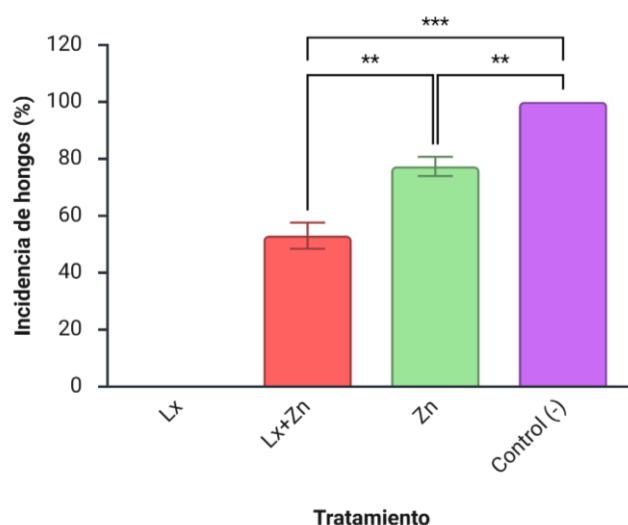


Figura 4 Efecto de los tratamientos de priming en la incidencia de hongos en semillas de chiltepín (*Capsicum annuum* subsp. *glabriusculum*). Las barras representan el promedio \pm ES (n = 3). Los asteriscos indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de Tukey HSD ($p < 0.05$).

En segundo lugar, el tratamiento con nanopartículas de zinc (ZnO) en combinación con lixiviado registró una incidencia de $53 \pm 7.93\%$, mostrando una reducción parcial de la presencia de hongos en comparación con el control, aunque sin alcanzar la eficacia del lixiviado aplicado de manera individual. El tratamiento con ZnO aislado presentó una incidencia mayor, con $77.33 \pm 5.85\%$, reflejando un efecto limitado en la protección contra patógenos y evidenciando que su aplicación exclusiva no es suficiente para disminuir la susceptibilidad del chiltepín. Finalmente, el tratamiento control mostró la mayor incidencia, con 100%, confirmando la alta vulnerabilidad de las semillas y plántulas de chiltepín a hongos fitopatógenos en ausencia de insumos de manejo.

4.4. ALTURA DE PLÁNTULAS

La altura de las plántulas de chiltepín mostró diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. El **lixiviado de lombricompost** presentó el mayor efecto positivo, alcanzando una altura promedio de **14,33 ±1,52 cm**, lo que evidencia su capacidad para estimular el crecimiento inicial de manera más eficiente que los demás tratamientos (Figura 5).

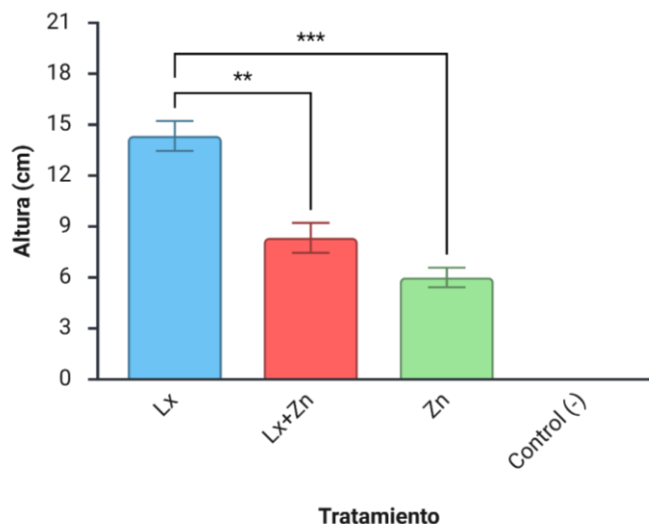


Figura 5 Efecto de los tratamientos de priming en la altura de plántulas de chiltepín (*Capsicum annuum* subsp. *glabriusculum*). Las barras representan el promedio ± ES (n = 3). Los asteriscos indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de Tukey HSD ($p < 0.05$).

En segundo lugar, el tratamiento con **nanopartículas de zinc (ZnO) en combinación con lixiviado** registró una altura promedio de **8,33±1,52 cm**, reflejando un efecto moderado en comparación con el bioinsumo aplicado de forma individual. El tratamiento con **ZnO aislado** mostró un crecimiento limitado, con una altura promedio de **6±1cm**, lo que indica que su aplicación exclusiva no favorece de manera significativa el desarrollo inicial de las plántulas. Finalmente, el **tratamiento control** no presentó crecimiento, con un valor de **0 cm**, debido a la ausencia total de germinación.

Estos resultados confirman que el uso de bioinsumos, particularmente el lixiviado de lombricompost, representa una estrategia eficaz para promover el crecimiento inicial de plántulas de chiltepín, mientras que las nanopartículas de zinc muestran un efecto reducido cuando se aplican de manera aislada.

5. DISCUSIÓN

Los resultados muestran que el lixiviado de lombricompost estimuló la germinación y el vigor de las plántulas de chiltepín. Este efecto puede interpretarse a la luz de estudios previos que señalan que las sustancias húmicas, ácidos orgánicos y microorganismos presentes en bioinsumos actúan como inductores de respuestas fisiológicas en semillas y como supresores de patógenos en diversos cultivos hortícolas (Muhie et al., 2020; García et al., 2024). En este caso, la ausencia de hongos en el tratamiento sugiere un mecanismo de biocontrol natural. La literatura ha documentado que la competencia microbiana y la producción de metabolitos antifúngicos son procesos clave en la supresión de patógenos, lo cual coincide con hallazgos en cebolla y lechuga (Hernández et al., 2007).

Esto indica que el lixiviado no solo aporta nutrientes, sino que también modula la microbiota de la endósfera, favoreciendo un ambiente protector para la germinación.

En contraste, las nanopartículas de zinc (ZnO) mostraron un efecto limitado cuando se aplicaron de manera aislada. Aunque investigaciones en tomate y pimiento reportan mejoras en germinación y resistencia, en chiltepín la respuesta parece depender de la concentración y de la interacción con la microbiota del sustrato (Méndez-Argüello et al., 2016; Hernández et al., 2024). Este hallazgo sugiere que el ZnO podría actuar más como micronutriente regulador que como agente antimicrobiano directo. La alta incidencia de hongos observada en este tratamiento refuerza la idea de que, sin apoyo de comunidades microbianas benéficas, las nanopartículas no ejercen un control efectivo sobre patógenos. En este sentido, el papel del ZnO debería analizarse más como modulador fisiológico que como insumo de biocontrol.

El tratamiento combinado (lixiviado + ZnO) mostró resultados intermedios, lo que abre un debate sobre la compatibilidad entre bioinsumos y nanotecnología. En lugar de una sinergia, podría existir antagonismo: las nanopartículas pueden afectar la colonización de microorganismos benéficos presentes en el lixiviado, reduciendo su capacidad de establecerse en la endósfera. Este fenómeno ha sido reportado en otros sistemas donde

la interacción entre nanomateriales y microbiota genera efectos no lineales (Vázquez-Núñez, 2023).

Por ello, se requiere investigar dosis óptimas y condiciones de aplicación que permitan aprovechar los beneficios de ambos insumos sin comprometer la actividad microbiana.

Una limitación importante del presente trabajo es que se realizó en condiciones controladas de laboratorio. En campo, factores como la variabilidad ambiental, la composición del suelo y la presencia de comunidades microbianas más complejas podrían modificar la respuesta observada. Además, la dinámica de interacción entre bioinsumos y nanopartículas puede ser distinta en suelos con mayor heterogeneidad biológica y química. Reconocer esta limitación es fundamental para evitar extrapolaciones directas y para orientar futuros estudios hacia ensayos en condiciones reales de cultivo.

En relación con el objetivo del estudio, los hallazgos permiten interpretar que los bioinsumos agroecológicos ofrecen ventajas más claras para la germinación y sanidad del chiltepín que la nanotecnología aplicada de manera aislada. Sin embargo, el hecho de que la combinación no haya mostrado un efecto superior plantea preguntas relevantes sobre la compatibilidad entre ambos enfoques. Este aspecto abre una línea de investigación prometedora, centrada en comprender los mecanismos de interacción y en diseñar estrategias de aplicación ajustadas que potencien la producción sustentable de esta especie nativa.

6. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió evaluar el efecto del lixiviado de lombricompost, las nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) y su combinación sobre la germinación y sanidad de plántulas de chiltepín. Los resultados obtenidos confirman que los bioinsumos agroecológicos, representados en este caso por el lixiviado de lombricompost, constituyen una alternativa más efectiva que la nanotecnología aplicada de manera aislada para favorecer la emergencia y el vigor inicial de esta especie nativa. La ausencia de hongos en los tratamientos con lixiviado sugiere la existencia de mecanismos de biocontrol natural, posiblemente asociados a la competencia microbiana y a la producción de metabolitos antifúngicos, lo cual refuerza la relevancia de los bioinsumos en la protección fitosanitaria temprana.

Por otro lado, las nanopartículas de ZnO mostraron un efecto limitado en chiltepín, lo que indica que su función se orienta más hacia la regulación nutricional que hacia la supresión directa de patógenos. La alta incidencia de hongos en este tratamiento evidencia que, sin el acompañamiento de comunidades microbianas benéficas, las nanopartículas no logran garantizar un ambiente protector para la germinación. Este hallazgo pone de relieve la necesidad de considerar la interacción entre nanotecnología y microbiota del sustrato antes de recomendar su uso en sistemas agroecológicos.

El tratamiento combinado (lixiviado + ZnO) presentó resultados intermedios, lo que sugiere que la integración de bioinsumos y nanotecnología no siempre genera efectos sinérgicos. Por el contrario, puede existir antagonismo que limite la colonización de microorganismos benéficos en la endósfera. Este aspecto abre una línea de investigación relevante para determinar condiciones de compatibilidad y dosis óptimas que permitan aprovechar las ventajas de ambos insumos sin comprometer la actividad microbiana.

Una limitación importante del estudio es que se desarrolló en condiciones controladas de laboratorio, lo que restringe la extrapolación directa a sistemas de campo. Factores como la variabilidad ambiental, la composición del suelo y la complejidad de las comunidades microbianas podrían modificar la respuesta observada. Por ello, se recomienda realizar

ensayos en condiciones reales de cultivo que permitan validar la eficacia de los tratamientos en escenarios productivos más representativos.

En síntesis, los hallazgos de esta investigación aportan evidencia de que los bioinsumos agroecológicos son una herramienta clave para mejorar la germinación y sanidad del chiltepín, contribuyendo a la producción sustentable de esta especie de alto valor cultural y económico en México. Asimismo, la exploración de combinaciones ajustadas entre bioinsumos y nanotecnología representa un campo prometedor que, con el respaldo de estudios adicionales, podría fortalecer las estrategias de manejo integrado en sistemas agrícolas sustentables.

7. LITERATURA CITADA

- Alcalá-Rico, J. S. G. J., Ramírez-Meraz, M., Maldonado-Moreno, N., Borja-Bravo, M., Camposeco-Montejo, N., & López-Benítez, A. (2023). Variación morfológica en frutos de genotipos de chile piquín (*Capsicum annum* var. *glabriusculum*) del noreste y centro de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(2).
- Alcívar Llivicura, M. F., Vera Rodríguez, J. H., Llivisupa Vasquez, L. M., Gómez Piña, J. C., Vicuña Rocano, M. S., & Mendoza Díaz, M. D. C. (2021). Influencia del vermicompost y sus lixiviados sobre la germinación de hortalizas en un suelo sódico. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5517938>
- Altamirano Quiroz, M. T., & Aparicio Rentería, A. E. (2002). Efecto de la lombricomposta como sustrato alternativo en la germinación y crecimiento inicial de *Pinus oaxacana* Mirov y *Pinus rudis* Endl. *Foresta Veracruzana*, 4(1), 35–40.
- Anchondo-Aguilar, A., González-Aldana, R. A., Luján-Aguirre, R. S., & Piña-Ramírez, F. J. (2024). Chínipas, un municipio serrano reorganizándose en torno a la comercialización de chiltepín. *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 34(64), 1–25.
- Araiza Lizarde, N., Araiza Lizarde, E., & Martínez Martínez, J. G. (2011). Evaluación de la germinación y crecimiento de plántula de chiltepín (*Capsicum annum* L. var. *glabriusculum*) en invernadero. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 13(2), 16–23.
- Beltrán Burboa, J. N., López Peralta, M. C. G., Hernández Meneses, E., & Cruz Huerta, N. (2020). Germinación in vitro de chile chiltepín (*Capsicum annum* L. var. *glabriusculum*) y regeneración por organogénesis. *Agrociencia*, 54(2), 1–15. <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1901>
- Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD). (2025). Los bioinsumos comunitarios: herramienta clave para la transición agroecológica. <https://www.ciad.mx/los-bioinsumos-comunitarios-herramienta-clave-para-la-transicion-agroecologica/>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (s. f.). Chiltepín (*Capsicum annum* var. *glabriusculum*). EncicloVida. <https://enciclovida.mx/especies/211589.pdf>
- Coronel, F. P., & Silva, M. C. (2023). ¿El priming como nueva técnica sustentable para las semillas forestales? *Revista Quebracho*, 31(2), 308–320.
- Couh Uicab, Y. L., Mendoza Pedroza, J., Silva Martínez, G. A., Ramírez Medina, H., González Cruz, L., Bernardino Nicanor, A., Pichardo González, J. M., Verdugo Perales, M.,

- Huanca Mamani, W., & Acosta García, G. (2025). Influence of gibberellic acid and different NaCl concentrations on seed germination of wild piquin pepper (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*) collected in the Huasteca Veracruzana. *Applied Ecology and Environmental Research*, 23(4), 7743–7754.
https://www.aloki.hu/pdf/2304_77437754.pdf
- Devika, O. S., Singh, S., Sarkar, D., Barnwal, P., Suman, J., & Rakshit, A. (2021). Seed priming: A potential supplement in integrated resource management under fragile intensive ecosystems. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 654001.
<https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.654001>.
- Dirección General del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2023, 30 enero). El chiltepín, la importancia económica y biocultural del más pequeño de los chiles. <https://www.gob.mx/agricultura%7Cdgsiap/articulos/el-chiltepin-la-importancia-economica-y-biocultural-del-mas-pequeno-de-los-chiles>
- Donia, D. T., & Carbone, M. (2023). Seed priming with zinc oxide nanoparticles to enhance crop tolerance to environmental stresses. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(24), 17612. <https://doi.org/10.3390/ijms242417612>
- Flores Márgez, J. P. (2022). [Capítulo sobre chiltepín]. En E. González Pérez, A. V. Ayala Garay, & I. Orona Castillo (Comps.), *Alternativas para el manejo sostenible de la producción agroecológica en México (Libro Técnico Núm. 2)*. INIFAP–CIR Centro, Campo Experimental Bajío.
https://cathi.uacj.mx/bitstream/handle/20.500.11961/25364/FloresMargezJP_CapLibro_Chiltepin2022.pdf?sequence=
- Fortis Hernández, M., Pivaral Chávez, A. G., Galindo Guzmán, A. P., Preciado Rangel, P., Ruiz Ortega, F. J., & 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), e3939.
<https://doi.org/10.19136/era.a11n1.3939>
- Galindo-Guzmán, A. P., Fortis-Hernández, M., De La Rosa-Reta, C. V., Zermeño-González, H., & 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(spe28), 299–310.
- García-Santiago, J. C., Sánchez-Vega, M., Pérez-Hernández, H., & Méndez-López, A. (2025). Efecto del tipo de lixiviado de lombricomposta sobre el crecimiento, rendimiento y calidad de maíz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(3), 1–12.

- Ghosh, N., Dey, S., Guha, T., Paul, S., & Kundu, R. (2024). Recent advances in nano priming induced plant growth promotion and environmental stress tolerance. *The Nucleus*, 67, 653–674. <https://doi.org/10.1007/s13237-024-00506-1>
- Hayano-Kanashiro, C., Gámez-Meza, N., & Medina-Juárez, L. Á. (2016). Wild pepper *Capsicum annuum* var. *glabriusculum*: Taxonomy, plant morphology, distribution, genetic diversity, genome sequencing, and phytochemical compounds. *Crop Science*, 56(1), 1–11.
- Hernández-Lauzardo, A. N., Bautista-Baños, S., Velázquez-del Valle, M. G., & Hernández-Rodríguez, A. (2007). Uso de microorganismos antagonistas en el control de enfermedades postcosecha en frutos. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 25(1), 31–39.
- Hernández-Verdugo, S., Porras, F., Pacheco-Olvera, A., López-España, R. G., Villarreal-Romero, M., Parra-Terraza, S., & Osuna-Enciso, T. (2012). Caracterización y variación ecogeográfica de poblaciones de chile (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*) silvestre del noroeste de México. *Polibotánica*, (33), 175–191.
- Ibrahim, E. A. (2016). Seed priming to alleviate salinity stress in germinating seeds. *Journal of Plant Physiology*, 192, 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2015.12.011>
- Imtiaz, H., Shiraz, M., Mir, A. R., Siddiqui, H., & Hayat, S. (2023). Nano priming techniques for plant physio biochemistry and stress tolerance. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42, 6870–6890. <https://doi.org/10.1007/s00344-023-10981-6>
- Incotec. (s. f.). Las 3 técnicas estándar de priming de las semillas. <https://www.incotec.com/es-mx/news-and-media/news-and-opinion/the-3-standard-techniques-for-seed-priming>
- Jatana, B. S., Grover, S., Ram, H., & Baath, G. S. (2024). Seed priming: Molecular and physiological mechanisms underlying biotic and abiotic stress tolerance. *Agronomy*, 14(12), 2901. <https://doi.org/10.3390/agronomy14122901>
- Kamatchi Kala, B., Petchiammal, M., Poomari, M., Priyanka, S., & Raja Abinaya, A. (2018). Effect of vermicompost extract on seed germination and seedling growth of some leafy vegetables. *International Journal of Herbal Medicine*, 6(2), 28–32.
- Kraft, K. H., Brown, C. H., Nabhan, G. P., Luedeling, E., Luna Ruiz, J. de J., Coppens d'Eeckenbrugge, G., & Hijmans, R. J. (2014). Multiple lines of evidence for the origin of domesticated chili pepper, *Capsicum annuum*, in Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(17), 6165–6170. <https://doi.org/10.1073/pnas.1308933111>
- López Pérez, M. C., Juárez Maldonado, A., Benavides Mendoza, A., González Morales, S., & Pérez Labrada, F. (2023). Aqueous extract of coconut shell biochar as a pre-germination treatment increases seed germination and early seedling growth in chiltepin pepper

(*Capsicum annum* var. *glabriusculum*). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 51(1), Article 13097. <https://doi.org/10.15835/nbha51113097>

- Martínez Andrade, E. G. (2023). Estructura de la diversidad genómica del chiltepín (*Capsicum annum* var. *glabriusculum*) en México, evaluado a partir de ADN de diferentes fuentes de tejido y grado de domesticación (Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Martínez, M., Montero, J. C., Dean, E. A., Bye, R., Luna-Cavazos, M., Medina, J. M. & Rzedowski, J. 2020. Solanaceae I, géneros *Acnistus* – *Witheringia* (excepto *Solanum*). *Fl. Bajío Regiones Adyacentes*. 218: 1-238. Instituto de Ecología A. C. Centro Regional Bajío. Pátzcuaro, Michoacán, México
- Mc Caughey-Espinoza, D. M., Buitimea-Cantúa, G. V., Buitimea-Cantúa, N. E., Ayala-Astorga, G. I., & Ochoa-Meza, A. (2020). Propiedades fisicoquímicas y rendimiento de frutos de chile chiltepín (*Capsicum annum* var. *glabriusculum* Dunal) cultivados bajo diferentes condiciones de crecimiento. *Idesia (Arica)*, 38(3), 77–86. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292020000300077>
- Mendoza Alatorre, M., Infante Ramírez, R., González Rangel, M. O., Nevárez Moorillón, G. V., González Horta, M. C., Hernández Huerta, J., & Delgado Gardea, M. C. E. (2024). Enhancing drought stress tolerance and growth promotion in chiltepin pepper (*Capsicum annum* var. *glabriusculum*) through native *Bacillus* spp. *Scientific Reports*, 14, Article 15383. <https://www.nature.com/articles/s41598-024-65720-y>
- Molina Maldonado, C., Morales Cuen, A., & Márquez Castillo, A. (2009). Técnicas para el establecimiento y producción de chiltepín silvestre bajo un sistema agroforestal en Sonora, México (*Capsicum annum* var. *glabriusculum*). Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) & Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). <https://prodep.solicitudv3.tecnm.mx/archivospdf/Informes/Producto1187933.PDF>
- Montes- Hernández, S. 2010. Proyecto. Recopilación y análisis de la información existente de las especies del género *Capsicum* que crecen y se cultivan en México. INIFAP-CONABIO.
- Muhie, S. H., Yildirim, E., Memis, N., & Demir, I. (2020). Vermicompost priming stimulated germination and seedling emergence of onion seeds against abiotic stresses. *Seed Science and Technology*, 48(2), 153–157. <https://doi.org/10.15258/sst.2020.48.2.02>
- Nile, S. H., Thiruvengadam, M., Wang, Y., Samynathan, R., Shariati, M. A., Rebezov, M., ... Kai, G. (2022). Nano priming as emerging seed priming technology for sustainable agriculture—recent developments and future perspectives. *Journal of Nanobiotechnology*, 20, 254. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01423-8>

- Ochoa Chaparro, E. H., Patiño Cruz, J. J., Anchondo Páez, J. C., Pérez Álvarez, S., Chávez Mendoza, C., Castruita Esparza, L. U., Muñoz Márquez, E., & Sánchez, E. (2025). Seed nanopriming with ZnO and SiO₂ enhances germination, seedling vigor, and antioxidant defense under drought stress. *Plants*, 14(11), 1726. <https://doi.org/10.3390/plants14111726>
- Pan, J., Wang, H., You, Q., Cao, R., Sun, G., & Yu, D. (2023). Jasmonate regulated seed germination and crosstalk with other phytohormones. *Journal of Experimental Botany*, 74(4), 1162–1175. <https://doi.org/10.1093/jxb/erac440>
- Paparella, S., Araújo, S. S., Rossi, G., Wijayasinghe, M., Carbonera, D., & Balestrazzi, A. (2015). Seed priming: State of the art and new perspectives. *Plant Cell Reports*, 34(8), 1281–1293. <https://doi.org/10.1007/s00299-015-1784-y>
- Pérez-Muñoz, B., Cruz-López, V., Rosas-Díaz, J., & Cruz-Martínez, H. (2025). Evaluación de nanopartículas de óxido de zinc sobre la germinación y crecimiento de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*). *Ciencia e Innovación Agroalimentaria*, 6(6), 141.
- Puebla Gutiérrez, M. A. (2013). Intermediación en el mercado de chiltepín de la región Río Sonora (Tesis de maestría). Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD). <https://ciad.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1006/410>
- Qin, C., Yu, C., Shen, Y., Fang, X., Chen, L., Min, J., Cheng, J., Zhao, S., Xu, M., Luo, Y., Yang, Y., Wu, Z., Mao, L., Wu, H., Ling-Hu, C., Zhou, H., Lin, H., Gonzalez-Morales, S., Trejo-Saavedra, D. L., ... Zhang, G. (2014). Whole-genome sequencing of cultivated and wild peppers provides insights into *Capsicum* domestication and specialization. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(14), 5135–5140. <https://doi.org/10.1073/pnas.1400975111>
- Quintero Castellanos, M. F., Guillen Castillo, O., Delgado Sánchez, P., Marín-Sánchez, J., Guzmán, A. I., Sánchez, A., & Guzmán, J. M. (2018). Relieving dormancy and improving germination of Piquín chili pepper (*Capsicum annum* var. *glabriusculum*) by priming techniques. *Cogent Food & Agriculture*, 4(1), 1550275. <https://doi.org/10.1080/23311932.2018.1550275>
- Ramírez Ojeda, G. (2017). Diversidad morfológica, fisiológica y climática en colectas de chile piquín (*Capsicum annum* var. *glabriusculum*) en México (Tesis de maestría). Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México. http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/10521/4426/1/Ramirez_Ojeda_G_MC_RGP_Fisiologia_Vegetal_2017.pdf
- Rhaman, M. S., Rauf, F., Tania, S. S., & Khatun, M. (2020). Seed priming methods: Application in field crops and future perspectives. *Asian Journal of Research in Crop Science*, 5(2), 8–19. <https://doi.org/10.9734/AJRCS/2020/v5i230091>

- Rosales-Castillo, R., Velázquez-de Lucio, B. S., Hernández-Domínguez, E. M., & Álvarez-Cervantes, J. (2025). Bioinsumos: Una alternativa para lograr una agricultura sostenible. *Terra Latinoamericana*, 43, e2045. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2045>
- SADER – Estrategia de Acompañamiento Técnico. (2022). Manual 15: Lixiviado de lombriz. Producción para el Bienestar. <https://www.anec.org.mx/wp-content/uploads/2022/10/Manual-15-Lixiviado-de-lombriz.pdf>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2022). Bioinsumos: transición agroecológica. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/agricultura/documentos/bioinsumos-transicion-agroecologica>
- Vázquez Núñez, E. (2023). Uso de nanomateriales en la agricultura y sus implicaciones ecológicas y ambientales. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 16(30).
- Verma, K., Kumari, K., Rawat, M., Devi, K., & Joshi, R. (2025). Crosstalk of jasmonic acid and salicylic acid with other phytohormones alleviates abiotic and biotic stresses in plants. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 25, 4997–5019. <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02443->
- Villegas-Cornelio, V. M., & Laines Canepa, J. R. (2017). Vermicompostaje: II avances y estrategias en el tratamiento de residuos sólidos orgánicos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(2), 407–421. <https://doi.org/1029312/remexca.v8i2.60>
- Yagız, A. K., & Çalışkan, M. E. (2024). Effects of TiO₂ nano priming on tomato seed germination and plant development. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 34(1), 62–72. <https://doi.org/10.36899/JAPS.2024.1.0695>