

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE CIENCIAS SOCIOECONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE SOCIOLOGÍA



**EFEECTO DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA DE MAGNETITA-BIOCARBÓN DE
CÁSCARA DE NUEZ EN PLÁNTULAS DE CHILE JALAPEÑO (Capsicum
annuum L.) COMO FERTILIZANTE DE USO SUSTENTABLE**

POR:

EDUARDO AMADOR LUNA

TESIS

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de

INGENIERO AGRONOMO EN DESARROLLO RURAL

Saltillo, Coahuila, México

Febrero 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE CIENCIAS SOCIOECONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE SOCIOLOGÍA

EFFECTO DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA DE MAGNETITA-BIOCARBÓN DE
CÁSCARA DE NUEZ EN PLÁNTULAS DE CHILE JALAPEÑO (Capsicum
annuum L.) COMO FERTILIZANTE DE USO SUSTENTABLE

Por:

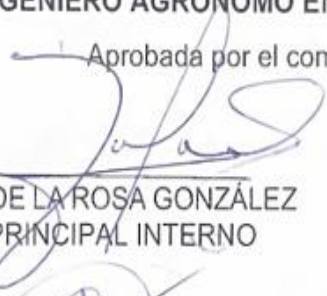
EDUARDO AMADOR LUNA

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRONOMO EN DESARROLLO RURAL

Aprobada por el comité de asesoría:


DR. RAFAEL DE LA ROSA GONZÁLEZ
ASESOR PRINCIPAL INTERNO


DRA. SASIROT KHAMKURE
ASESOR PRINCIPAL EXTERNO


DR. AUDBERTO REYES ROSAS
COASESOR


M.C. ETELBERTO CORTEZ QUEVEDO
COASESOR


LIC. NORMA EUGENIA SÁNCHEZ GARCÍA
COORDINADORA DE DIVISIÓN DE CIENCIAS SOCIOECONÓMICAS



Saltillo, Coahuila, México

Febrero 2026

Declaración de no plagio

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y 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 presentarlas como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Por lo anterior, nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.

Pasante



EDUARDO AMADOR LUNA

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada paso de este camino. Gracias por darme la sabiduría, la paciencia y la perseverancia necesarias para culminar esta etapa tan importante de mi vida. En los momentos de dificultad, fuiste mi refugio, en los momentos de alegría, mi mayor bendición. Sin tu amor, tu gracia y tu infinita misericordia, este logro no habría sido posible. A ti encomiendo cada uno de mis esfuerzos y este trabajo que hoy presento, con gratitud profunda por acompañarme siempre y por iluminar mi camino hacia nuevos sueños y metas.

A mi Alma Terra Mater, La Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, que me abrió sus puertas y me brindó la oportunidad de formarme tanto académica como personalmente. Gracias por ser el espacio donde crecí, aprendí y enfrenté desafíos que fortalecieron mi vocación y compromiso profesional. Llevaré siempre con orgullo el nombre de mi universidad, agradeciendo las experiencias, valores y aprendizajes que marcaron esta etapa tan importante de mi vida, y permitirme ser parte de la gran familia Buitre

Al Departamento de sociología, Agradezco por la formación académica y el apoyo brindado a lo largo de mi preparación profesional. Agradezco a cada uno de los docentes que forman parte del departamento, quienes con su dedicación, paciencia y compromiso contribuyeron significativamente a mi desarrollo académico y personal.

A la Doctora Sasirot Khamkure, y Al Doctor Audberto Reyes Rosas, mis asesores principales por su valiosa orientación, paciencia y compromiso durante el desarrollo de esta tesis. Su experiencia, dedicación y constantes aportes fueron fundamentales para enriquecer este trabajo y para mi crecimiento profesional. Gracias por su apoyo, confianza y por motivarme a dar siempre lo mejor de mí en cada etapa de este proceso.

DEDICATORIAS

A mi Madre Nicol Luna Reyes, por ser mi mayor inspiración, esa persona que amo y quiero mucho, mi primer amor esa persona que elegiría una y mil veces como madre que a pesar de todo nunca se rinde ante cualquier adversidad mi gran guerrera, por su amor incondicional, su apoyo constante y sus sacrificios silenciosos. A la mujer que me enseñó a no rendirme, que convirtió los obstáculos en oportunidades y que siempre creyó en mis sueños, gracias por creer en mí incluso cuando yo dudaba, y por enseñarme con tu ejemplo el valor del esfuerzo y la perseverancia, gracias a ti soy lo que soy hoy en día. Este logro no es solo mío si no también es tuyo, eres todo para mí.

¡Gracias, Te amo Madre!

A mis hermanos, Roberto Luna y Rodrigo Luna, compañeros de vida y cómplices de sueños y experiencias, gracias por su paciencia, consejos y por impulsarme a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles testigos de este logro los amo y los quiero mucho que a pesar de la distancia siempre han estado para mí. Sin ustedes, este logro no sería el mismo.

A mi hermano Rene Luna y Esposa Itzel Rodríguez e hijas Debany Rodríguez y Luna Zulay, A mi hermano, quien ha sido más que familia, ha sido guía, ejemplo y fortaleza en los momentos más difíciles. Gracias por creer en mí, por tus consejos sabios y por demostrarme con tu vida que la constancia y el esfuerzo siempre dan frutos. A tu esposa, por su apoyo sincero, por sus palabras de ánimo y por abrirme siempre las puertas con cariño y comprensión. Y a mis queridas sobrinas, quienes con su inocencia, alegría y amor iluminan cada día y me recuerdan la importancia de luchar por nuestros sueños. Que este logro sea también una inspiración para ustedes. Este trabajo también les pertenece, porque sin su apoyo y amor, el camino habría sido mucho más difícil.

A mi compañera Moni, por su apoyo incondicional, su confianza y su cariño constante. Gracias por acompañarme en este camino.

INDICE

DEDICATORIAS.....	V
RESUMEN	IX
CAPITULO I	10
INTRODUCCIÓN.....	10
CONTEXTO GLOBAL.....	11
PROBLEMÁTICA SOCIOAMBIENTAL	12
VENTANA DE OPORTUNIDAD	13
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
HIPOTESIS	14
OBJETIVO GENERAL	14
OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	14
CAPITULO II: MARCO TEORICO	15
2.1 SOCIOAGRONOMIA Y SUSTENTABILIDAD.....	15
2.2 AGRICULTURA FAMILIAR: IMPACTO DE LOS NANOFERTILIZANTES EN PEQUEÑOS PRODUCTORES	16
2.3 FUNDAMENTOS CIENTIFICOS INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA DE NANOCOMPUESTOS DE MAGNETITA FUNCIONALIZADOS CON BIOCARBÓN EN LA ABSORCIÓN Y TRANSPORTE EN PLANTAS.....	17
2.3.1 NANO-BIOINTERACCIONES: EFECTO TAMAÑO PARTÍCULA EN LA ABSORCIÓN RADICAL (MODELO DE TRANSPORTE TRANSCELULAR).....	17
2.4 BIOCARBÓN: PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS QUE MODULAN LIBERACIÓN DE NUTRIENTES.	20

CAPITULO III: MATERIALES Y METODOS	21
3.1 MÉTODO DE PREPARACIÓN DE LA CÁSCARA DE NUEZ	21
3.2 SÍNTESIS DE NANOCOMPUESTOS MAGNETITA–BIOCARBÓN DE CÁSCARA DE NUEZ (BMF).....	22
INSTRUMENTAL Y MATERIALES DE LABORATORIO	23
3.3 PROCEDIMIENTO DE SÍNTESIS DEL NANOCOMPUESTO MAGNETITA–BIOCARBÓN	27
3.4 ESTABLECIMIENTO DEL CULTIVO CHILE JALAPEÑO (<i>CAPSICUM ANNUMM L.</i>)	28
3.4.1 ETAPA 1: SIEMBRA EN CHAROLAS DE GERMINACIÓN BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO	28
3.4.2 ETAPA 2: TLASPLANTE	31
3.5 CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES DE LOS NANOCOMPUESTOS DE MAGNETITA-BIOCARBON.....	34
DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX).....	34
CAPITULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
4.1 ESTRUCTURA CRISTALINA (XRD) DE LOS NANOCOMPUESTOS DE MAGNETITA-BIOCARBÓN	38
4.2 ANÁLISIS DE GRUPOS FUNCIONALES MEDIANTE ESPECTROSCOPÍA DE INFRARROJO (FTIR).....	39
4.2.1 CONFIRMACIÓN DE MAGNETITA (Fe_3O_4).	40
4.2.2 ANÁLISIS DE MORFOLOGÍA Y COMPOSICIÓN ELEMENTAL (SEM-EDS).....	42
4.3 ANALISIS DE MAPEO ELEMENTAL POR EDS	46

4.4 DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CRECIMIENTO POR TRATAMIENTO, MEDIDOS EN CONDICIÓN DE CHAROLA DE GERMINACIÓN Y MACETA, BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO	49
CAPITULO V	61
CONCLUSIONES.....	61
RECOMENDACIÓN:	62
REFERENCIAS.....	63

RESUMEN

El chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.) es un cultivo de gran importancia económica y alimentaria. En este estudio se desarrollaron nanofertilizantes sostenibles a partir de residuos agrícolas, específicamente nanocompuestos de biocarbón de magnetita y cáscara de nuez pecana (BMF), con el objetivo de mejorar el crecimiento del cultivo y promover la economía circular. Los nanocompuestos se sintetizaron mediante coprecipitación química utilizando tres tamaños de partícula de biomasa: BMF1 (0.1-0.18 mm), BMF2 (0.18-0.38 mm) y BMF3 (0.38-0.70 mm). Las técnicas de caracterización (DRX, EDS y FTIR) confirmaron la formación exitosa de nanopartículas cristalinas de magnetita (Fe_3O_4) ancladas al biocarbón, con alta pureza y presencia de grupos funcionales que favorecen la retención y quelación de nutrientes. Los ensayos realizados en charolas de germinación durante 28 días y en maceta durante 46 días, bajo condiciones de invernadero, mostraron que la aplicación de BMF mejoró significativamente el vigor vegetativo del chile jalapeño, especialmente durante la etapa vegetativa. El tratamiento BMF2, con tamaño de partícula intermedio y dosis de 6 g/kg, fue el más eficiente, logrando incrementos del 125 % en la altura de la planta, 47 % en el número de hojas y hasta 3.7 veces más biomasa fresca respecto al control (Testigo). Los resultados estadísticos confirmaron que el tamaño de partícula intermedio optimiza la reactividad superficial y la aireación del sustrato. En conjunto, el estudio demuestra que los nanofertilizantes a base de biocarbón de magnetita son una alternativa ecológica y eficiente a los fertilizantes convencionales, con alto potencial para fortalecer la agricultura sostenible de pequeña escala en México.

Palabras clave: partícula, nanocompuestos, magnetita, biocarbón, chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.)

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

El chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.) es uno de los cultivos hortícolas más importantes en México y otros países productores, tanto por su valor económico como por su relevancia cultural y gastronómica. Su producción, sin embargo, enfrenta diversos desafíos, entre los cuales destacan las condiciones edáficas deficientes, el uso excesivo de fertilizantes químicos y la baja eficiencia en la absorción de nutrientes durante las etapas iniciales del desarrollo vegetal. Estos factores pueden limitar significativamente el crecimiento y la calidad de las plántulas, afectando el rendimiento final del cultivo (Aguilar-Rincón *et al.* 2010).

Ante esta situación, la aplicación de nanomateriales en la agricultura ha cobrado relevancia como una estrategia innovadora para mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes, optimizar el desarrollo de las plantas y reducir el impacto ambiental. En particular, los nanocompuestos de magnetita funcionalizado con biocarbón de origen agroindustrial, como el obtenido a partir de cáscara de nuez, emergen una alternativa prometedora debido a sus propiedades fisicoquímicas (Azimi *et al.* 2014). La magnetita aporta hierro biodisponible, esencial para procesos fisiológicos clave como la fotosíntesis y la síntesis de clorofila, mientras que el biocarbón contribuye a la mejora de las características del suelo, favorece la retención de agua y nutrientes, y estimula la actividad microbiana beneficiosa en la rizosfera (Beegum y Das 2022).

No obstante, el tamaño de partícula de estos nanocompuestos es un factor determinante en su comportamiento y eficacia, ya que influye directamente en su movilidad, absorción por parte de las plantas y posibles efectos tóxicos o estimulantes (Aguilar-Rincón *et al.* 2010). Por ello, resulta fundamental evaluar el efecto de diferentes tamaños de partícula sobre variables fisiológicas y morfológicas del cultivo, especialmente durante las etapas tempranas de crecimiento (Bewley *et al.* 2013).

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo analizar el efecto del tamaño de partícula de nanocompuestos de magnetita-biocarbón elaborados a partir de cáscara de nuez sobre el crecimiento y la calidad de plántulas de chile jalapeño, contribuyendo así al desarrollo de tecnologías agrícolas sostenibles basadas en el aprovechamiento de residuos orgánicos y la aplicación responsable de nanotecnología (Ertus y Yazıcılar 2023).

CONTEXTO GLOBAL

En las últimas décadas, la agricultura mundial se ha enfrentado a grandes desafíos como el cambio climático, la degradación de suelos, la escasez de agua y la creciente demanda de alimentos por parte de un aumento demográfico (Faraji y Sepehri 2019). Ante este panorama, se ha vuelto imprescindible desarrollar estrategias de producción agrícola más eficientes, sostenibles y resilientes, que permitan garantizar la seguridad alimentaria sin comprometer los recursos naturales ni la salud de los ecosistemas (Gong *et al.* 2020).

Bajo esta premisa, el uso de nanotecnología en la agricultura ha cobrado relevancia a nivel internacional como una herramienta innovadora para mejorar la eficiencia en la nutrición vegetal, reducir el uso excesivo de fertilizantes químicos y aumentar la productividad de los cultivos. Los nanomateriales aplicados al suelo o directamente a las plantas pueden mejorar la disponibilidad de nutrientes, estimular el metabolismo vegetal y contribuir a un manejo más racional de los insumos agrícolas (Begna 2021).

Paralelamente, existe un creciente interés global en el aprovechamiento de residuos agroindustriales mediante procesos de transformación que permitan generar productos con valor agregado, como el biocarbón. Este material, además de reducir el impacto ambiental de los desechos, mejora las propiedades del suelo y potencia el desarrollo vegetal, sobre todo cuando se combina con nanocompuestos de metales esenciales como el hierro (Fe_3O_4) (Azimi *et al.* 2014).

Por lo tanto, el estudio del efecto de nanocompuestos elaborados a partir de residuos orgánicos, como la cáscara de nuez, representa una línea de investigación alineada con los objetivos globales de sostenibilidad agrícola, innovación tecnológica y economía circular (Liu y Lal 2015). En particular, evaluar cómo el tamaño de partícula de estos materiales influye en el crecimiento y calidad de cultivos hortícolas, como el chile jalapeño, permite avanzar en el diseño de prácticas agrícolas más eficientes, responsables y adaptadas a las condiciones actuales del sector agroalimentario mundial (Ma *et al.* 2016).

PROBLEMÁTICA SOCIOAMBIENTAL

La producción agrícola intensiva, ejemplificada en el cultivo del chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.), se enfrenta a diversos desafíos ambientales y sociales que comprometen tanto la sustentabilidad de los ecosistemas como la seguridad alimentaria. Entre las principales problemáticas destaca el uso desmedido de fertilizantes sintéticos, lo cual no solo incrementa los costos de producción, sino que también provoca la degradación y contaminación de los suelos [19]. Aunado a esto, se estima que entre el 90 % y el 95 % de los agricultores carecen de un acceso efectivo a la nanotecnología; esto deriva en la pérdida de oportunidades para optimizar el crecimiento de los cultivos, especialmente considerando que investigaciones recientes demuestran que los nanocompuestos de magnetita y biocarbón (derivados de la cáscara de nuez) pueden potenciar la absorción de nutrientes esenciales (hierro, fósforo y potasio), así como el desarrollo radicular y foliar (Nejatzadeh 2021).

Por otro lado, el deterioro progresivo de la fertilidad del suelo y la ineficiente asimilación de nutrientes, particularmente en la etapa de plántula, resultan en bajos rendimientos y pérdidas económicas que impactan directamente a los pequeños productores y sectores vulnerables del campo. A esta situación se suma la generación de residuos agroindustriales, como la cáscara de nuez, que en diversas regiones carecen de un manejo adecuado y se acumulan de forma improductiva, desaprovechando su potencial como materia prima de alto valor (Oshunsanya *et al.* 2019).

Ante este panorama, surge la necesidad urgente de implementar soluciones innovadoras que integren tecnologías limpias y sostenibles. En este contexto, los nanocompuestos de magnetita combinados con biocarbón de residuos orgánicos representan una alternativa viable para estimular el desarrollo vegetal, reducir la dependencia de agroquímicos y otorgar valor agregado a materiales de desecho/revalorización.

VENTANA DE OPORTUNIDAD

Actualmente, existe una creciente demanda de alternativas agrícolas que sean más sostenibles, eficientes y respetuosas con el medio ambiente. La nanotecnología aplicada a la agricultura representa una oportunidad emergente para optimizar la disponibilidad de nutrientes y disminuir la dependencia de fertilizantes sintéticos. Asimismo, la revalorización de residuos orgánicos —en este caso, la cáscara de nuez— genera un impacto positivo tanto para los agricultores como para el ecosistema, ya que permite la producción de materiales como el biocarbón, los cuales se alinean con la economía circular y favorecen la conservación de las propiedades del suelo (Soni *et al.* 2024).

Sin embargo, una variable crítica poco explorada es el tamaño de partícula de los nanocompuestos aplicados al suelo, debido a que este factor puede modificar significativamente su comportamiento, tasas de absorción y efectos fisiológicos en las plantas. Este vacío en el conocimiento constituye una ventana de oportunidad para perfeccionar el diseño y la aplicación de bioestimulantes basados en nanomateriales, garantizando su eficacia técnica y mitigando posibles riesgos ambientales (Upadhyay *et al.* 2023).

Por lo tanto, la presente investigación ofrece la posibilidad de generar conocimiento científico de alto valor tanto para el sector académico como para el agrícola. Esto contribuye al desarrollo de tecnologías de precisión, sustentables y adaptadas a las necesidades específicas de cultivos de importancia comercial, tales como el chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.) (López-Martínez *et al.* 2023).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Subaprovechamiento de residuos agroindustriales: Existe una gestión ineficiente de subproductos agrícolas, específicamente de la cáscara de nuez pecana, lo que impide su integración en sistemas de producción agrícola sostenibles y modelos de economía circular.

Vacío de conocimiento técnico-científico: Se desconoce el efecto específico que tiene el tamaño de partícula en nanofertilizantes compuestos por magnetita y biocarbón (derivado de cáscara de nuez) sobre los indicadores de crecimiento y desarrollo fisiológico en plántulas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.). Esta falta de información limita la optimización de insumos biotecnológicos para mejorar el rendimiento de los cultivos y el aprovechamiento de residuos.

HIPOTESIS

La aplicación de los nanocompuestos BMF, sintetizados a partir del menor tamaño de partícula de precursor (cáscara de nuez) evaluado (0.1–0.18 mm), incrementará significativamente el rendimiento del cultivo en un $\geq 25\%$. Este incremento se atribuye a una mayor superficie de contacto que favorece la biodisponibilidad de hierro y una mayor eficiencia en la liberación controlada de nutrientes en la rizósfera.

OBJETIVO GENERAL

Determinar el efecto del tamaño de partícula del precursor (cáscara de nuez) en los nanocompuestos de magnetita-biocarbón (BMF) sobre el crecimiento inicial, el desarrollo radicular y la calidad fisiológica de plántulas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.).

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- **Sintetizar y caracterizar** los nanocompuestos BMF utilizando tres rangos granulométricos del precursor de cáscara de nuez: 0.1–0.18 mm, 0.18–0.38 mm y 0.38–0.70 mm.

- **Evaluar el desarrollo vegetativo** de las plántulas mediante la medición de altura, número de hojas y área foliar.
- **Determinar el vigor fisiológico** de las plántulas a través de la medición del índice de verdor (NDVI).
- **Identificar el tamaño de partícula óptimo** del precursor que maximice la calidad de la plántula para su posterior trasplante en campo.

CAPITULO II: MARCO TEORICO

2.1 SOCIOAGRONOMIA Y SUSTENTABILIDAD

La propuesta teórica de la Fundación Ellen MacArthur se basa en el concepto de economía circular, un modelo económico que plantea una transformación profunda en los patrones actuales de producción y consumo, alejándose del esquema lineal tradicional de “extraer, producir, usar y desechar” (Aguilar-Rincón *et al.* 2010). En su lugar, la economía circular se orienta a mantener los productos, materiales y recursos en circulación durante el mayor tiempo posible, con el propósito de maximizar su valor, mitigar la generación de residuos y minimizar el impacto ambiental a lo largo de todo el ciclo de vida de los bienes (Azimi *et al.* 2014).

De acuerdo con la Fundación Ellen MacArthur, este modelo se sustenta en tres principios fundamentales:

Eliminar residuos y contaminación desde el diseño:

Consiste en desarrollar sistemas, productos y procesos que prevengan la generación de externalidades negativas desde su concepción, en lugar de enfocarse únicamente en la gestión de residuos *ex post* (Azimi *et al.* 2014).

Mantener productos y materiales en uso:

Este principio promueve la circulación continua de componentes y materiales mediante ciclos técnicos (reparación, reutilización y reciclaje) o ciclos biológicos

(biodegradación o compostaje), asegurando su permanencia en el sistema económico (Azimi *et al.* 2014).

Regenerar los sistemas naturales:

Implica adoptar prácticas que restauren, mantengan y mejoren los ecosistemas naturales, en lugar de degradarlos, permitiendo así que la actividad económica contribuya activamente a la renovación de los recursos naturales (Azimi *et al.* 2014).

2.2 AGRICULTURA FAMILIAR: IMPACTO DE LOS NANOFERTILIZANTES EN PEQUEÑOS PRODUCTORES

La agricultura familiar representa un componente esencial en la garantía de la seguridad alimentaria a nivel global; según la FAO (2019), este sector comprende más del 80 % de las unidades productivas agrícolas en todo el mundo (Oshunsanya *et al.* 2019). Este modelo de producción no solo aporta significativamente a la disponibilidad de alimentos básicos, sino que también cumple una función estratégica en el desarrollo económico y social de las comunidades rurales, particularmente en países en vías de desarrollo como México (Ruiz-Torres y García López 2021). No obstante, los pequeños productores suelen enfrentar diversos obstáculos, entre ellos el acceso limitado a insumos agrícolas de calidad, la degradación de la fertilidad, el elevado costo de los fertilizantes y la carencia de tecnologías adaptadas a sus condiciones locales (Soni *et al.* 2024).

Ante esta problemática, los nanofertilizantes se presentan como una alternativa tecnológica prometedora para fortalecer la eficiencia y sostenibilidad de la agricultura familiar (Nejatzadeh 2021). Estos insumos, diseñados mediante procesos nanotecnológicos, permiten una liberación controlada de nutrientes, lo que optimiza su disponibilidad para las plantas y minimiza las pérdidas por procesos como la lixiviación o la volatilización (Nejatzadeh 2021). En comparación con los fertilizantes convencionales, requieren menores dosis de aplicación, lo que favorece tanto el rendimiento del cultivo como la mitigación del impacto ambiental (Nejatzadeh 2021).

Asimismo, el uso de nanofertilizantes elaborados a partir de materiales renovables y de bajo costo—como el biocarbón derivado de la cáscara de nuez—ofrece a los pequeños productores una alternativa viable para mejorar su productividad, reducir gastos operativos. Esta estrategia no solo contribuye a la revalorización de subproductos locales, sino que también promueve una mayor autonomía tecnológica y refuerza los principios de economía circular en el entorno rural (Pedraza y Gómez 2008).

2.3 FUNDAMENTOS CIENTIFICOS INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA DE NANOCOMPUESTOS DE MAGNETITA FUNCIONALIZADOS CON BIOCARBÓN EN LA ABSORCIÓN Y TRANSPORTE EN PLANTAS

2.3.1 NANO-BIOINTERACCIONES: EFECTO TAMAÑO PARTÍCULA EN LA ABSORCIÓN RADICAL (MODELO DE TRANSPORTE TRANSCELULAR)

El estudio de las nano-biointeracciones ha cobrado una relevancia crítica en la ciencia agrícola, contemporánea, particularmente en la comprensión de cómo los nanomateriales interactúan con los sistemas fisiológicos vegetales (Reyes-Díaz *et al.* 2022). En este contexto, el tamaño de partícula emerge como un factor determinante, ya que condiciona la movilidad, la biodisponibilidad, la tasa de absorción y la distribución sistémica de los nanocompuestos dentro de los tejidos de la planta (Reyes-Díaz *et al.* 2022).

En cuanto a la captación por el sistema radicular, se han identificado dos rutas de transporte principales:

1. Transporte apoplástico: Ocurre a través de los espacios intercelulares y las paredes celulares, sin atravesar la membrana plasmática.

2. Transporte simplástico (o transcelular): Implica el paso de las partículas a través del citoplasma mediante conexiones como los plasmodesmos. En el caso de las nanopartículas, este mecanismo es especialmente complejo, pues deben superar barreras selectivas como la porosidad de la pared celular y la permeabilidad de la membrana plasmática para acceder finalmente al sistema vascular (xilema y floema) (Oshunsanya *et al.* 2019).
3. El tamaño de las nanopartículas representa un parámetro crítico en estos procesos (Nazeer *et al.* 2023). Investigaciones han demostrado que partículas con diámetros menores a 50 nanómetros tienen una mayor probabilidad de atravesar membranas celulares mediante endocitosis, mientras que partículas más grandes tienden a quedar retenidas en las paredes celulares o en el espacio apoplástico (Oshunsanya *et al.* 2019).
4. Específicamente para los nanocompuestos de magnetita funcionalizados con biocarbón, el tamaño de partícula no solo determina la eficiencia en la liberación de hierro (Fe) en formas asimilables, sino también su capacidad de translocación hacia los órganos aéreos. Es importante acotar que, aunque una reducción en el tamaño favorece la movilidad intracelular, también puede incrementar el riesgo de fitotoxicidad si no se establecen umbrales de concentración adecuados que eviten el estrés oxidativo en la planta (Oshunsanya *et al.* 2019).

(Fe_3O_4): Mecanismos de quelación de nutrientes y mitigación de estrés abiótico. La magnetita (Fe_3O_4) es un óxido mixto de hierro que ha despertado interés en aplicaciones agrícolas debido a sus propiedades fisicoquímicas únicas, especialmente en escala nanométrica. Estas nanopartículas poseen una elevada relación superficie-volumen, alta reactividad superficial y la capacidad de interactuar con compuestos tanto orgánicos como inorgánicos, lo que les permite modular diversos procesos fisiológicos en los vegetales (Upadhayay *et al.* 2023).

Uno de los principales beneficios agronómicos de la magnetita radica en su capacidad para liberar hierro en formas biodisponibles, esenciales para funciones celulares como la síntesis de clorofila, la respiración celular y los procesos fotosintéticos (Upadhayay *et al.* 2023). Además, puede participar en mecanismos de quelación, actuando como agente estabilizador y transportador de micronutrientes al formar complejos solubles con otros iones metálicos (como Zn^{2+} , Mn^{2+} o Cu^{2+}), mejorando su disponibilidad para la planta, especialmente en suelos con pH alto o en condiciones de deficiencia nutricional (Upadhayay *et al.* 2023).

Asimismo, las nanopartículas de magnetita tienen un papel relevante en la mitigación del estrés abiótico, como el causado por sequía, salinidad o toxicidad por metales pesados (Oshunsanya *et al.* 2019). Estudios han mostrado que este tipo de nanomaterial puede estimular la actividad de enzimas antioxidantes como el superóxido dismutasa (SOD), la catalasa (CAT) y la peroxidasa (POD), contribuyendo a la reducción de especies reactivas de oxígeno (ROS), las cuales se acumulan en situaciones de estrés ambiental. Esto favorece el mantenimiento de la integridad celular, la estabilidad de membranas y el equilibrio osmótico en las plantas (Oshunsanya *et al.* 2019).

Adicionalmente, al integrarse con materiales como el biocarbón, la magnetita puede mejorar su estabilidad y capacidad de interacción en el suelo, facilitando procesos

como la retención de nutrientes, el intercambio iónico y la activación de microorganismos beneficiosos en la rizosfera (Oshunsanya *et al.* 2019).

Por estas razones, el uso de nanocompuestos de magnetita, especialmente cuando son diseñados a partir de materiales sostenibles como residuos agroindustriales, representa una estrategia innovadora para mejorar la eficiencia del manejo nutrimental y aumentar la tolerancia de los cultivos a condiciones adversas, con un enfoque compatible con la agricultura regenerativa y sustentable (Liu y Lal 2015).

2.4 BIOCARBÓN: PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS QUE MODULAN LIBERACIÓN DE NUTRIENTES.

Las nanopartículas de biocarbón (< 50 nm) derivadas de cáscara de nuez presentan una alta área superficial específica y porosidad fina, lo que favorece la adsorción de nutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), y una liberación gradual y eficiente hacia el sistema radicular de la planta (Liu *et al.* 2022).

El biocarbón de cáscara de nuez, por su estructura microporosa y grupos funcionales superficialmente activos, presenta una alta capacidad quelante de metales, reteniendo iones como cadmio (Cd^{2+}), cobre (Cu^{2+}), plomo (Pb^{2+}), y zinc (Zn^{2+}), mediante mecanismos de intercambio catiónico y adsorción química (González *et al.* 2022). No solo reduce la movilidad y la fitotoxicidad de metales contaminantes, sino que también contribuye a un efecto nutrimental más estable y bioseguro (Kalia y Kaur 2019).

CAPITULO III: MATERIALES Y METODOS

3.1 MÉTODO DE PREPARACIÓN DE LA CÁSCARA DE NUEZ

La cáscara de nuez pecana se sometió a un proceso de acondicionamiento físico con el objetivo de eliminar impurezas y estandarizar el material para su posterior procesamiento térmico. El procedimiento (Figura 1) se llevó a cabo siguiendo las etapas descritas a continuación:

- I. Inicialmente, el material se lavó con agua filtrada para remover residuos superficiales.
- II. Posteriormente se sometió a un baño ultrasónico durante 3 minutos (180 s), utilizando una cesta con una ocupación aproximada del 50 % de su volumen.
- III. El agua fue escurrida y reemplazada repetidamente por agua limpia hasta que el enjuague resultó transparente.
- IV. Posteriormente, se retiraron manualmente los restos de nuez adheridos a la cáscara para evitar posibles contaminaciones.
- V. El material limpio fue secado en charolas dentro de un horno a 70 °C durante un periodo de 12 horas (una noche) hasta alcanzar peso constante.
- VI. Una vez seco, se procedió a la molienda utilizando molinos de laboratorio (Thomas-WILEY Laboratory Mill, modelo 4, USA, y Blue M Electric Company, modelo B-3005-Q).
- VII. El material molido fue tamizado mediante mallas de diferentes números (N° 18, 25, 40, 80 y 140) con el fin de obtener fracciones de distintos tamaños de partícula.
- VIII. Las fracciones granulométricas obtenidas correspondieron a: 0.1–0.18 mm, 0.18–0.38 mm y 0.38–0.70 mm.

IX. El material tamizado fue almacenado en bolsas de plástico hasta su utilización.



Figura 1: Proceso por el cual paso la preparación de la cáscara de Nuez.

3.2 SÍNTESIS DE NANOCOMPUESTOS MAGNETITA–BIOCARBÓN DE CÁSCARA DE NUEZ (BMF)

El experimento inició el 20 de mayo de 2025 en el laboratorio del Departamento de Riego y Drenaje de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

La síntesis de los nanofertilizantes se llevó a cabo mediante el método de coprecipitación, modificando el estudio de Ruiz-Moreno (RuizMoreno R. G. *et. al.* 2013) y utilizando como precursores cloruro férrico hexahidratado

($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), sulfato ferroso heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), hidróxido de sodio (NaOH) y citrato de sodio ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$).

Para la síntesis de los adsorbentes, se utilizaron las fracciones retenidas entre las mallas:

- Para la obtención de los adsorbentes funcionalizados, se integraron las fracciones de cáscara de nuez previamente clasificadas según su granulometría. El proceso de coprecipitación (Figura 2) se aplicó de manera individual a las fracciones retenidas entre los siguientes juegos de mallas: N° 25, N° 40, N° 80 y N° 140.

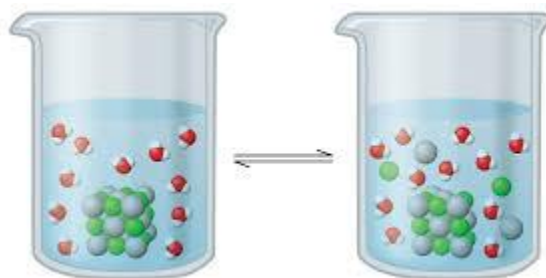


Figura 2: Proceso de coprecipitación y recubrimiento de biocarbón de cáscara de nuez con nanopartículas de magnetita para la obtención de nanocompuestos de distinto tamaño de partícula.

INSTRUMENTAL Y MATERIALES DE LABORATORIO

Para el desarrollo experimental de la síntesis de los nanocompuestos y el acondicionamiento de la biomasa, se utilizó el siguiente equipo: una balanza analítica (Figura 3) para el pesaje de precisión y un agitador magnético (Figura 4) para la homogeneización de la mezcla en Vaso de precipitado (Figura 5). El control de la reacción se realizó con un medidor de pH (Figura 6), mientras que la clasificación por tamaños se logró mediante un tamizador vibratorio (Figura 7). Finalmente, se emplearon recipientes de pesaje (Figura 8) y un molino de laboratorio (Figura 9) para la pulverización y manejo de la cáscara de nuez.



Figura 3: Balanza analítica empleada para la cuantificación de precisión de insumos y biomasa.



Figura 4: Agitador magnético utilizado para la homogeneización de la mezcla durante la síntesis.



Figura 5: Vaso de precipitado



Figura 6: Medidor de pH (potenciómetro) para el monitoreo de la reacción de coprecipitación.



Figura 7: Tamizador para la clasificación granulométrica de la cáscara de nuez.



Figura 8: Recipiente de pesaje



Figura 9: Molino de laboratorio empleado en la tritución y pulverización de la biomasa.

La cáscara de nuez pecana se seleccionó como matriz orgánica y soporte para la síntesis de los nanocompuestos de magnetita-biocarbón (BMF). Esta elección se fundamenta en su elevada porosidad, alto contenido de carbono y su capacidad intrínseca para interactuar con nanomateriales. Como se observa en la Figura 10, el uso de este residuo agroindustrial no solo permite una estabilización eficiente de las partículas, sino que también mejora propiedades del sustrato como la retención de humedad y la disponibilidad nutrimental, factores que favorecen directamente el vigor de las plántulas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.).



Figura 10: La biomasa de cáscara de nuez como soporte y matriz orgánica para la síntesis de nanocompuestos de magnetita-biocarbón (BMF). Se destaca su porosidad y capacidad de interacción para la estabilización de nanopartículas.



Figura 11: Reactivos químicos empleados en la síntesis de los nanocompuestos de magnetita-biocarbón: citrato de sodio, hidróxido de sodio, sulfato ferroso y cloruro férrico.

3.3 PROCEDIMIENTO DE SÍNTESIS DEL NANOCOMPUESTO MAGNETITA–BIOCARBÓN

El proceso de obtención de los nanocompuestos se fundamenta en una serie de etapas secuenciales que garantizan la correcta funcionalización de la biomasa. Para facilitar la comprensión de esta ruta experimental, en la Figura 12 se presenta el diagrama de flujo detallado, el cual abarca desde la preparación de las soluciones precursoras de hierro hasta la estabilización, purificación y secado del material final

- I. Para cada síntesis, se disolvieron 43.24 g de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y 43.2 g de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en 200 mL de agua desionizada bajo agitación constante a 500 rpm durante 10 min (Esquema 1).
- II. Posteriormente, se añadió biomasa de cáscara de nuez tamizada en una proporción en peso equivalente (Esquema 1) al contenido total de hierro, utilizando diferentes tamaños de partícula: BM F1 (0.1–0.17 mm), BM F2 (0.17–0.38 mm) y BM F3 (0.38–0.70 mm).
- III. De manera paralela, se preparó una solución de 120 g de NaOH disueltos en 1000 ml de agua desionizada, la cual fue adicionada lentamente a la mezcla bajo agitación durante 15 minutos (Esquema 1).
- IV. Posteriormente, se añadieron 50 g de citrato de sodio de forma gradual y se mantuvo la agitación durante 10 minutos adicionales (Esquema 1).
- V. Una vez concluido el proceso de adición, las soluciones se dejaron en reposo durante toda la noche para favorecer la formación del precipitado (Esquema 1).
- VI. El material sólido (de color negro) se separó por decantación magnética y se lavó tres veces con agua desionizada hasta alcanzar un pH neutro.
- VII. Finalmente, los materiales fueron secados en un horno a 40 °C hasta alcanzar peso constante (Esquema 1).
- VIII. Una vez secos, los nanocompuestos fueron molidos suavemente en mortero y almacenados en frascos para su posterior uso (Esquema 1).

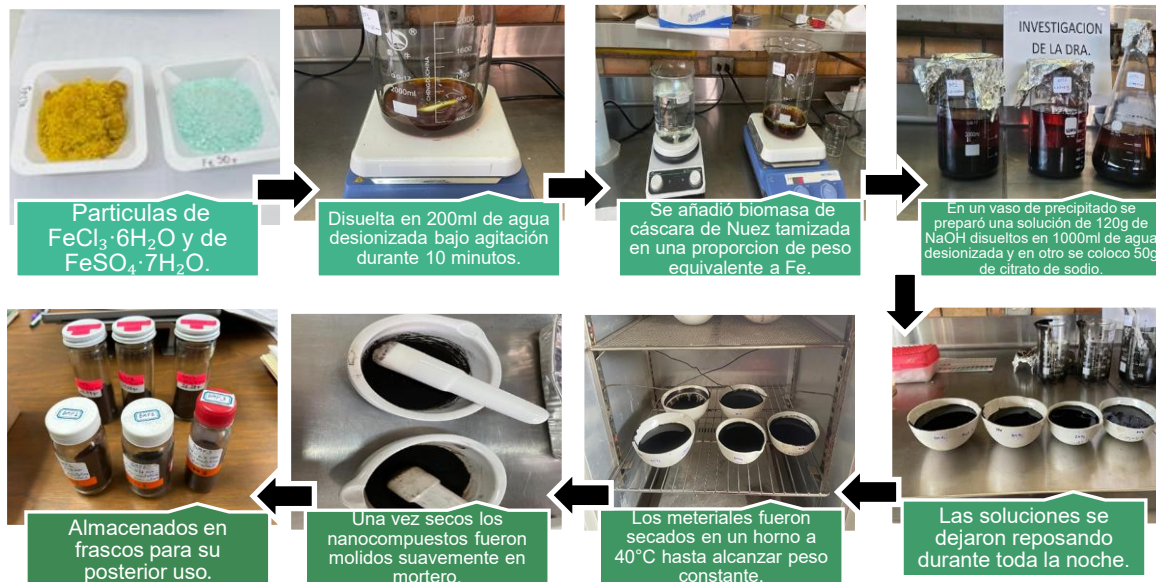


Figura12: Diagrama de flujo del proceso de síntesis de nanocompuestos de magnetita-biocarbón (BMF) mediante coprecipitación química.

3.4 ESTABLECIMIENTO DEL CULTIVO CHILE JALAPEÑO (*capsicum annum L.*)

3.4.1 ETAPA 1: SIEMBRA EN CHAROLAS DE GERMINACIÓN BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO

- I. Las actividades correspondientes a esta primera fase se llevaron a cabo durante el ciclo primavera-verano de 2025, en la figura 13 ilustro el invernadero, ubicado en el Campo Agrícola Experimental del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA). Este sitio se encuentra al noreste de la ciudad de Saltillo, Coahuila, con coordenadas geográficas de $25^\circ 27' 37''$ latitud norte, $100^\circ 58' 6''$ longitud oeste y a una altitud de 1610 metros sobre el nivel del mar



Figura 13: Invernadero en el cual fue llevado dicho experimento

La plantación de chile jalapeño se llevó a cabo bajo condiciones de invernadero, utilizando una infraestructura diseñada para proporcionar un ambiente protegido y controlado, que posibilitó la regulación de variables ambientales como temperatura, humedad y luz, contribuyendo al adecuado crecimiento del cultivo (Figura 14).

- II. En laboratorio, se pesaron los tratamientos correspondientes a tres tipos de biomasa de cáscara de nuez (BM) con diferente tamaño de partícula: BM F1 (0.1–0.17 mm), BM F2 (0.17–0.38 mm) y BM F3 (0.38–0.70 mm). Para cada fracción granulométrica se evaluaron tres dosis: 0.75 g, 3 g y 6 g por kilogramo de sustrato, dando un total de nueve tratamientos, y el respectivo testigo.
- III. El sustrato utilizado para la germinación fue Peat Moss, debido a su ligereza, adecuada retención de humedad y buena aireación. Se pesaron 250 g de sustrato por tratamiento, incluyendo el testigo.
- IV. El experimento se estableció en invernadero bajo un diseño completamente al azar, con 10 tratamientos y 3 repeticiones. Cada repetición estuvo conformada por 30 plántulas. Se instaló un sistema de riego automatizado por aspersión. Posteriormente, el sustrato fue mezclado con las respectivas dosis de biomasa y se llenaron las

charolas de germinación conforme a los tratamientos y repeticiones establecidas.

- V. En cada celda de las charolas se colocó una semilla de chile híbrido (*Capsicum annuum*) como lo muestro en la (figura 14). Al finalizar la siembra, se aplicó un riego inicial con el objetivo de lograr una humectación homogénea del sustrato.



Figura 14: Siembra de semillas de pimiento híbrido (*Capsicum annuum*) en charolas de germinación.

- VI. La germinación fue monitoreada diariamente, observándose la emergencia de las primeras plántulas aproximadamente a los 10 días después de la siembra. Durante este periodo se mantuvo riego diario para asegurar condiciones adecuadas de humedad.
- VII. Se comenzó con el muestreo como se ilustra en la (Figura 15) a los 20 días después de la siembra (25 de junio de 2025) se realizó el primer muestreo, considerando 15 plántulas por tratamiento, distribuidas entre las tres repeticiones. Los parámetros evaluados fueron altura de plántula (medida desde la base del tallo hasta el ápice) y número de hojas.



Figura 15: Muestreo de plántulas de pimiento (*Capsicum annuum*) a los 20 días después de la siembra, para la evaluación de altura y número de hojas.

- VIII. Se realizaron muestreos posteriores a los 5 y 8 días después del primer muestreo (30 de junio y 3 de julio de 2025), evaluándose los mismos parámetros.

3.4.2 ETAPA 2: TRASPLANTE

- I. Trasplante a macetas y establecimiento del sistema de riego
A los 28 días después de la siembra, cuando las plántulas presentaron un desarrollo adecuado para el trasplante, se seleccionaron seis plántulas por tratamiento, incluyendo el testigo, considerando altura promedio y adecuado desarrollo radicular, para un total de 60 plantas.
- II. El trasplante se realizó en macetas de plástico como se presenta en el esquema 2, utilizando perlita como sustrato, debido a sus propiedades de aireación, drenaje y retención de humedad. Se instaló un sistema de riego por goteo automatizado. Cada maceta fue etiquetada para garantizar su correcta identificación y control experimental. Posteriormente, se aplicó un riego inicial para lograr una humectación uniforme del sustrato.
- III. Se aplicó una solución nutritiva con los elementos que presento en la tabla número 1, misma solución fue colocada en el sistema de riego por goteo

como se ilustra en la Figura 16, basada en la fórmula universal de Steiner, ajustada de acuerdo con el análisis químico del agua de riego. La composición de la solución se expresó en miliequivalentes por litro, utilizando fertilizantes comerciales en las concentraciones requeridas para el desarrollo del cultivo incluyendo en la solución nutritiva solo macronutrientes, con la intención de verificar si los materiales utilizados aportaban micronutrientes, principalmente hierro.

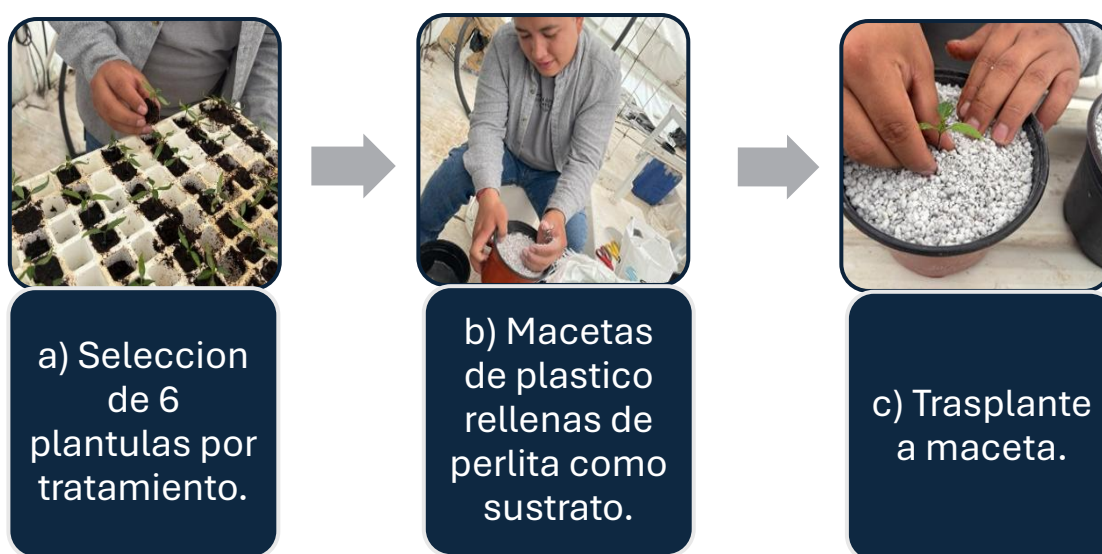


Figura 16: Trasplante de plántulas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.) en macetas con perlita y sistema de riego por goteo automatizado.

Tabla 1: Composición de la solución nutritiva utilizada en el sistema de riego por goteo, basada en la fórmula universal de Steiner y ajustada según el análisis químico del agua, expresada en miliequivalentes por litro.

NO_3^-	P	SO_4^{2-}	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
12	1	7	7	9	4



Figura 17: Aplicación de solución nutritiva mediante riego por goteo, formulada según la fórmula universal de Steiner y ajustada al análisis químico del agua.

- IV. Durante la etapa en maceta, se evaluaron los parámetros de altura de planta y número de hojas, considerando cuatro plantas por tratamiento, incluyendo el testigo. Asimismo, se determinó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), como indicador del vigor vegetal, evaluando cuatro plantas por tratamiento.



Figura 18: Desarrollo de las plántulas de chile (*Capsicum annuum*) en macetas durante la etapa de crecimiento, mostrando la distribución por tratamientos y repeticiones, el sistema de riego por goteo automatizado y la uniformidad de las plantas. Se evaluaron los parámetros de altura, número

de hojas y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) como indicadores de vigor.

- V. Al finalizar el experimento (18 de agosto de 2025), se realizó el corte de cuatro plantas por tratamiento, incluyendo el testigo. Las muestras fueron trasladadas al laboratorio, donde se registró el peso fresco.
- VI. Posteriormente, las plantas se colocaron en una estufa de laboratorio para la determinación del peso seco.

3.5 CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES DE LOS NANOCOMPUESTOS DE MAGNETITA-BIOCARBON

La caracterización de los materiales sintetizados es fundamental para confirmar la formación de los nanocompuestos y validar la interacción entre la fase metálica y el soporte orgánico.

DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

Esta técnica se utilizó en un difractómetro Bruker (Figura 19) para caracterizar la estructura de los materiales. El análisis permitió cumplir tres objetivos:

- **Identificación:** Confirmar la presencia de magnetita (Fe_3O_4) mediante su patrón de difracción característico.
- **Interacción:** Verificar el anclaje de las nanopartículas de hierro sobre la estructura del biocarbón.
- **Pureza:** Asegurar la calidad de la síntesis al descartar otros óxidos de hierro no deseados (como hematita o maghemita).



Figura 19 Difractómetro de rayos X marca Bruker utilizado para el análisis estructural de los materiales sintetizados.

ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO (FTIR)

Se utilizó un espectrómetro Frontier FT-IR/NIR (PerkinElmer) (Figura 20) para identificar los grupos funcionales (enlaces químicos) en la superficie del material. Los puntos clave del análisis fueron:

Matriz orgánica: Se detectaron grupos típicos de la cáscara de nuez, como los grupos hidroxilo (-OH) y carbonilo (C=O).

Confirmación de magnetita: Se identificó la vibración característica del enlace Fe-O, lo que asegura que la magnetita se integró correctamente al biocarbón.

Utilidad: Estos resultados confirman que el nanocompuesto conserva las propiedades químicas necesarias para actuar como un nanofertilizante eficiente.



Figura 20 Espectrofotómetro de infrarrojo medio (FTIR) modelo Frontier FT-IR/NIR

MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO Y MICROANÁLISIS ELEMENTAL (SEM-EDS)

Se utilizó un microscopio electrónico Philips (modelo XL30) equipado con un sensor de rayos X (EDS) (Figura 21) para analizar la apariencia física y la composición química de los materiales. Los objetivos de este análisis fueron:

- **Morfología:** Observar de forma detallada la superficie del biocarbón para visualizar cómo se depositaron los cúmulos de óxido de hierro sobre los poros de la cáscara de nuez.
- **Composición Elemental:** Realizar un microanálisis para cuantificar y confirmar la presencia de los elementos clave: Carbono (C), Oxígeno (O) e Hierro (Fe).
- **Mapeo Elemental:** Generar imágenes que muestran la distribución espacial de los elementos, asegurando que el hierro esté repartido de manera uniforme en todo el soporte de carbono.



Figura 21 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) con Espectroscopía de Rayos X Dispersiva por Energía (EDX).

CAPITULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ESTRUCTURA CRISTALINA (XRD) DE LOS NANOCOMPUESTOS DE MAGNETITA-BIOCARBÓN

La estructura cristalina de los nanocompuestos sintetizados (BMF1, BMF2 y BMF3) se analizó mediante XRD para confirmar la incorporación exitosa de nanopartículas de óxido de hierro en la matriz de biochar de cáscara de nuez pecanera. La Figura (22-Figura 24) muestra los difractogramas de las tres muestras en comparación con una referencia de magnetita

Todas las muestras BMF exhibieron picos de difracción distintivos en valores de 2θ de aproximadamente 30.1° , 35.5° , 43.1° , 53.5° , 57.1° y 62.7° . Estas reflexiones corresponden a los planos (220), (311), (400), (422), (511) y (440), respectivamente, los cuales son característicos de la estructura de espinela inversa cúbica centrada en las caras (fcc) de la magnetita (Fe_3O_4). La presencia de estos picos en todos los patrones de BMF confirma que la síntesis química depositó con éxito magnetita cristalina sobre el soporte carbonoso.

Al comparar las muestras, se observa que la intensidad de los picos de magnetita es mayor en BMF3, lo que sugiere un mayor grado de cristalinidad o una mayor concentración de óxido de hierro en esta formulación específica. Además, el ensanchamiento observado de los picos (en comparación con las líneas nítidas de la referencia) indica que las partículas de magnetita se encuentran dentro del rango nanométrico.

Por otro lado, el amplio halo observado en ángulos bajos se atribuye a la estructura de carbono amorfo del biochar, que representa los planos grafiticos (002). La coexistencia tanto del halo de carbono amorfo como de los picos definidos de magnetita confirma la naturaleza híbrida de los nanocompuestos BMF.

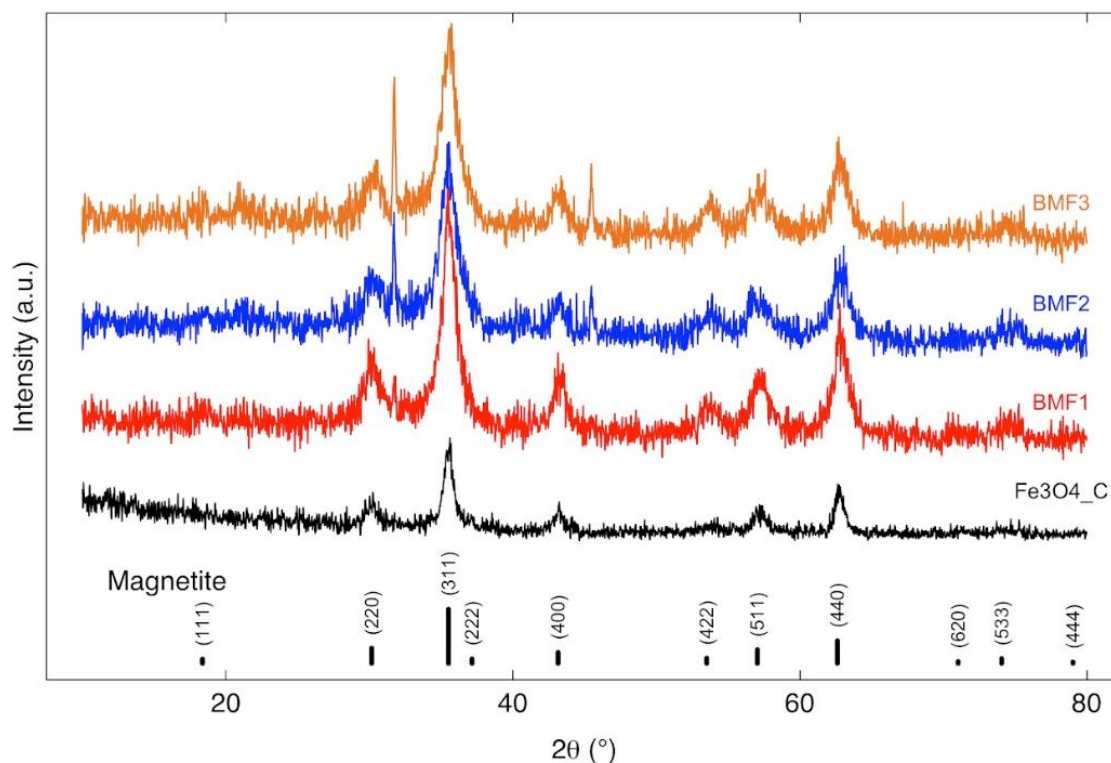


Figura 22 Difractogramas de rayos X (DRX) de los nanocompuestos de magnetita-biocarbón, donde se identifican los picos característicos de la fase espinela en materiales de los nanocompuestos de magnetita-biocarbón (BMF).

4.2 ANÁLISIS DE GRUPOS FUNCIONALES MEDIANTE ESPECTROSCOPÍA DE INFRARROJO (FTIR)

El análisis de FTIR confirmó la síntesis exitosa de los nanocompuestos de biocarbón de cáscara de nuez pecana funcionalizados con magnetita (BMF1–BMF3). Los espectros obtenidos resaltan la integración sinérgica entre la fase inorgánica (partículas magnéticas) y la matriz orgánica del biocarbón

Identificación de Grupos Funcionales

Los espectros identificaron varios grupos funcionales críticos derivados del precursor de biocarbón:

Grupos Hidroxilo (-OH): Una banda ancha entre $3200\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$ indica la presencia de celulosa/lignina residual y agua adsorbida, lo que favorece la hidrofilia y el intercambio de nutrientes.

Grupos Carbonilo/Carboxilo (C=O): Los picos en $1690\text{--}1710\text{ cm}^{-1}$ confirman la presencia de sitios que contienen oxígeno, esenciales para la complejación de nutrientes.

Estructura Aromática (C=C): Las bandas en $1580\text{--}1620\text{ cm}^{-1}$ reflejan la carbonización de la cáscara de nuez.

4.2.1 CONFIRMACIÓN DE MAGNETITA (Fe_3O_4).

El anclaje exitoso de la magnetita se confirmó mediante un pico agudo e intenso en $550\text{--}590\text{ cm}^{-1}$, que representa la vibración de estiramiento Fe-O . Esta firma fue consistente en todas las muestras, lo que demuestra que el método de coprecipitación integró eficazmente la magnetita cristalina independientemente del tamaño de partícula de la biomasa.

Influencia del Tamaño de Partícula y Potencial Agrícola

Los tamaños de partícula más pequeños (BMF1) mostraron picos de Fe-O más intensos, lo que sugiere que una mayor relación superficie-volumen permite una dispersión más uniforme y una carga más eficiente de magnetita.

La abundancia de grupos carboxilo e hidroxilo es biotecnológicamente significativa. Estos grupos sirven como "sitios activos" para formar complejos de coordinación con nutrientes (N, P, K), permitiendo un mecanismo de liberación controlada diseñado para cultivos como el chile jalapeño.

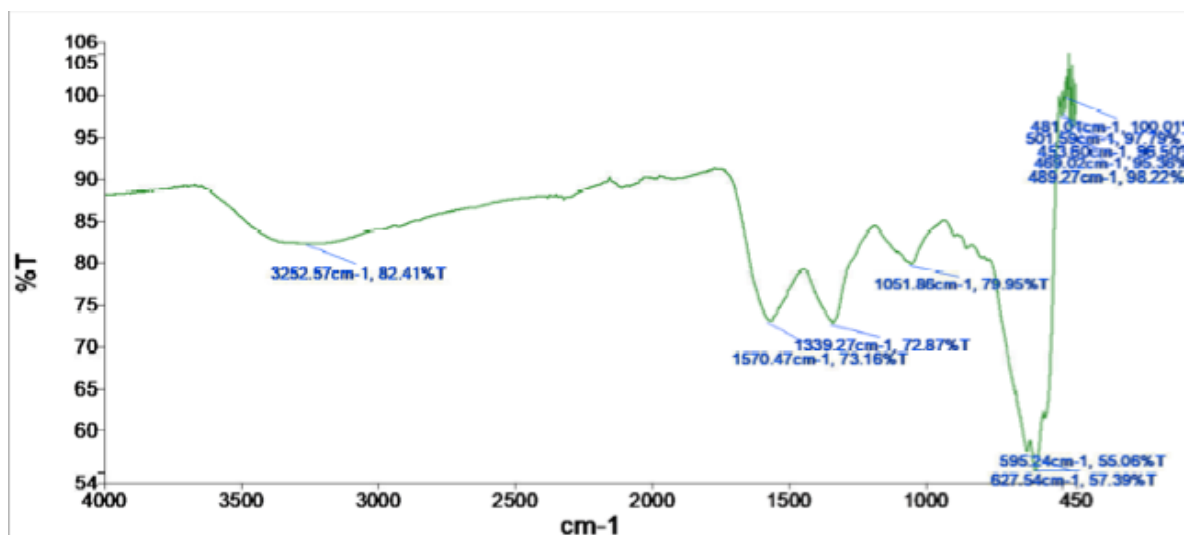


Figura 23 Espectros de nanopartículas de magnetita compuesto por biomasa BMF1 de cáscara de nuez por espectroscopia FTIR

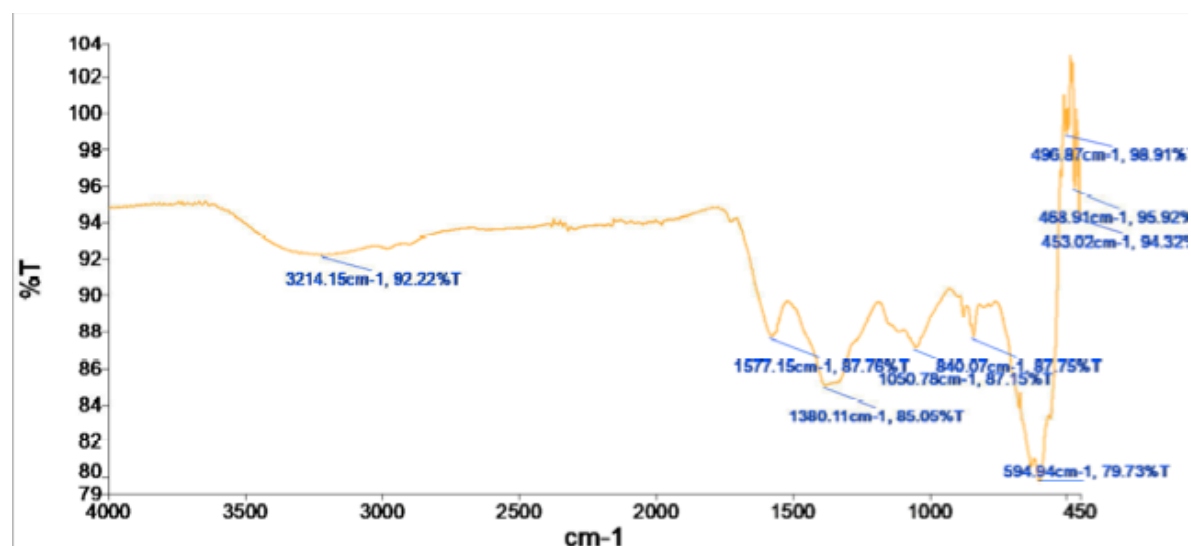


Figura 24 Espectros de nanopartículas de magnetita compuesto por biomasa BMF2 de cáscara de nuez por espectroscopia FTIR

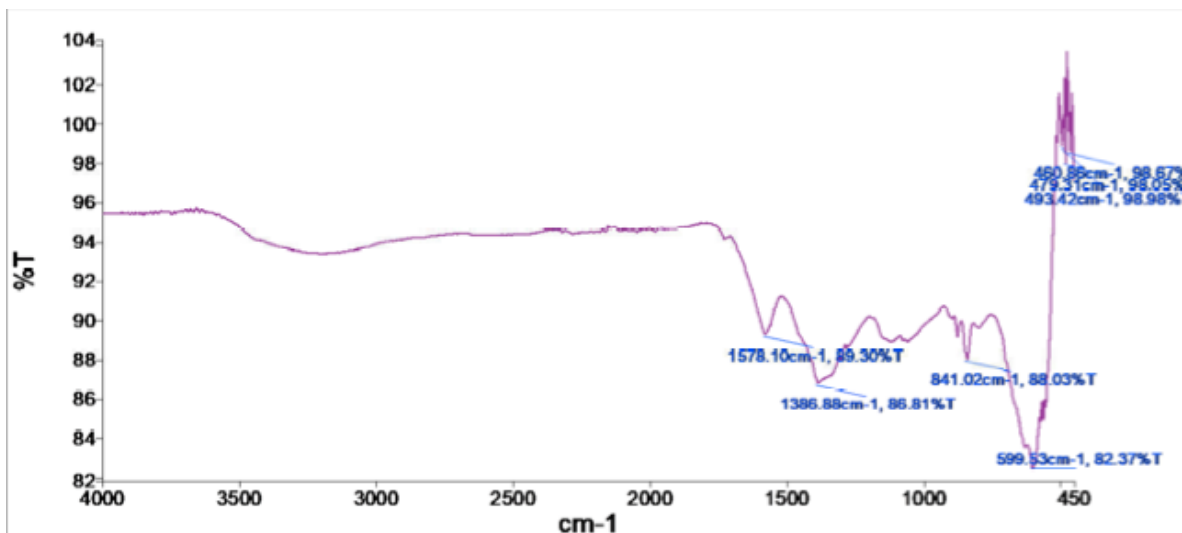


Figura 25 Espectros de nanopartículas de magnetita compuesto por biomasa BMF3 de cáscara de nuez por espectroscopia FTIR

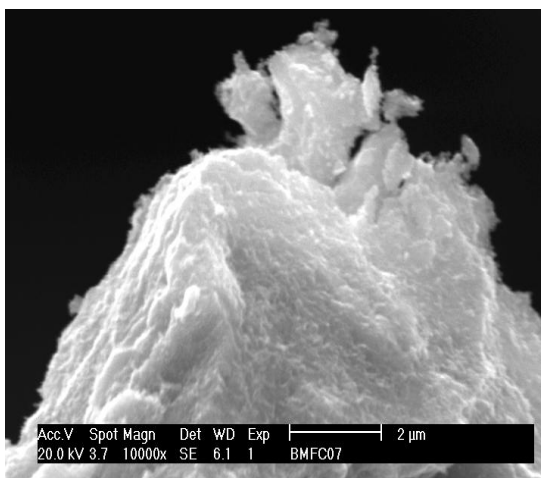
4.2.2 ANÁLISIS DE MORFOLOGÍA Y COMPOSICIÓN ELEMENTAL (SEM-EDS)

El análisis mediante microscopía electrónica de barrido ambiental (ESEM) y microanálisis por dispersión de energía (EDS) permitió visualizar la arquitectura física y confirmar la composición química del nanocompuesto BMF1 y BMF2.

El análisis EDX confirmó la composición química del nanocompuesto, validando los hallazgos de SEM y FTIR.

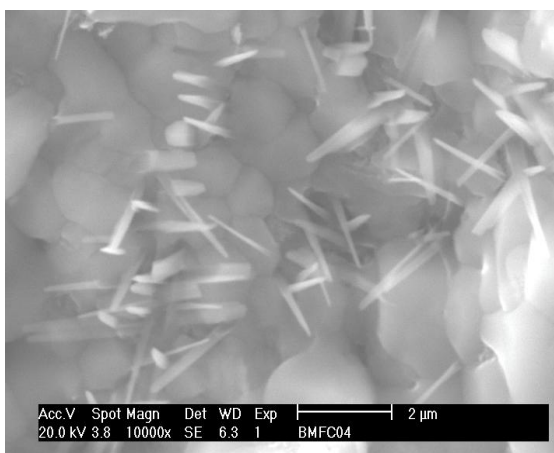
En la Región 1 (Figura 26), predomina el Hierro (Fe) con un 84.48% en peso, lo que indica que el haz de electrones se posicionó sobre un cúmulo denso de nanopartículas de magnetita. En la Región 2 (Figura 27), el porcentaje de Oxígeno (O) aumenta significativamente (39.20%) mientras que el Hierro disminuye (47.68%). Este cambio sugiere una zona donde la matriz de biocarbón (rica en oxígeno por sus grupos funcionales) interactúa más estrechamente con la magnetita, o bien, una zona de magnetita más dispersa.

Los datos elementales corroboran que los agregados observados en el biocarbón son efectivamente óxidos de hierro, asegurando que el material posee las propiedades magnéticas deseadas para su aplicación.



Elemento	Peso %	Atómico %
O K	5.38	14.98
Na K	7.2	13.94
Cl K	2.94	3.69
Fe K	84.48	67.39
Total	100	100

Figura 26: La figura de SEM de BMF1 y la composición elemental por EDX (Región 1).



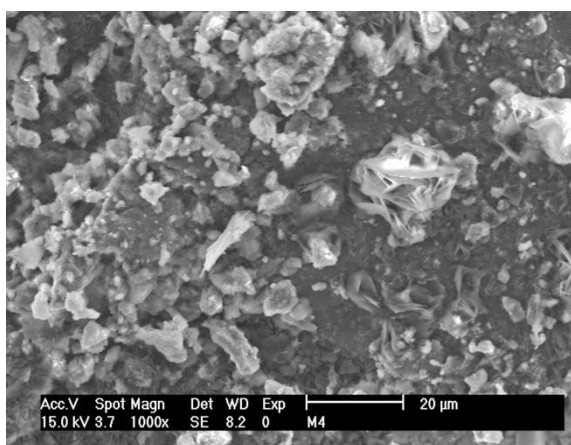
Elemento	Peso %	Atómico %
O K	39.2	63.31
Na K	12.83	14.42
Cl K	0.29	0.21
Fe K	47.68	22.06
Total	100	100

Figura 27: La figura de SEM de BMF1 y la composición elemental por EDX (Región 2).

Las micrografías SEM confirman la síntesis exitosa de un nanocompuesto heterogéneo de magnetita y biocarbón. A bajos aumentos, el material exhibe una matriz porosa característica del biocarbón de cáscara de nuez, la cual es fundamental para aplicaciones agrícolas al mejorar la retención de agua y la aireación del suelo. Los aumentos mayores revelan una textura superficial rugosa que optimiza la absorción y retención de nutrientes. Específicamente, se identificaron nanopartículas y pequeños aglomerados (~2 nm) anclados al

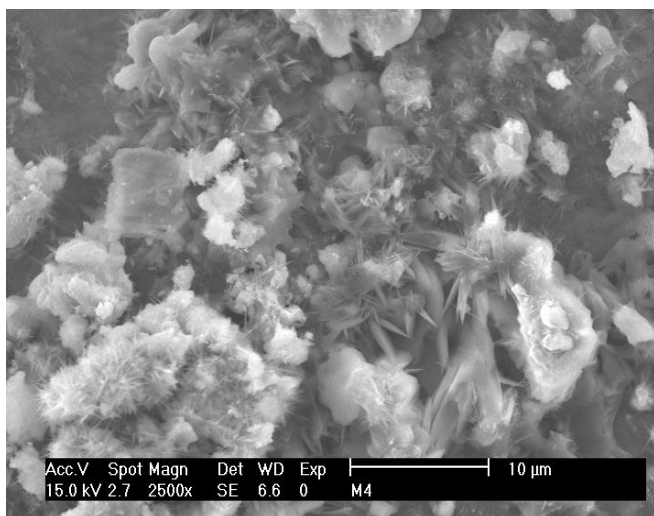
biocarbón. Los resultados indican que, mientras algunas partículas permanecen dispersas para una alta actividad superficial (Figura 26), otras forman cúmulos estables (Figura 27), garantizando la integridad estructural de la fase magnética sobre el soporte de carbono.

El análisis EDS confirma la formación exitosa del compuesto biocarbón-magnetita, identificando Carbono (17–35% en peso), Oxígeno (31–35%), Hierro (19–20%) y Sodio (11–23%). Aunque los niveles de hierro y oxígeno ratifican la presencia de magnetita y la matriz de carbono favorece la retención de agua, el análisis revela una alta concentración de sodio. Este contenido de sodio representa un riesgo potencial, ya que podría ser perjudicial para el crecimiento de las plantas.



Elemento	Peso %	Atómico %
C	17.41	28.18
O	35.26	42.85
Na	23.9	20.21
Al	0.25	0.18
Si	0.1	0.07
S	0.13	0.08
Cl	2.08	1.14
K	0.01	0.01
Ca	0.06	0.03
Fe	20.81	7.25
Total	100	100

Figura 28: La figura de SEM de BMF2 y la composición elemental por EDX (Región 1).



Elemento	Peso %	atómico %
C	35.19	50.3
O	31.9	34.23
Na	11.38	8.5
Al	0.26	0.17
Si	0.12	0.07
S	0.17	0.09
Cl	1.02	0.49
K	0.02	0.01
Ca	0.12	0.05
Fe	19.8	6.09
Total	100	100

Figura 29: La figura de SEM de BMF2 y la composición elemental por EDX (Región 2).

El análisis combinado de SEM y EDX confirmó la creación exitosa de un material híbrido diseñado para la agricultura:

El biocarbón de cáscara de nuez actúa como una base porosa y estable. El tamaño de partícula influye en la superficie disponible: el BMF1 (más fino) ofrece más sitios de anclaje que el BMF2.

Se observaron nanopartículas esféricas de hierro distribuidas en la superficie y dentro de los poros. El BMF1 presenta una mayor densidad y homogeneidad de estas partículas, mientras que el BMF2 muestra una distribución más equilibrada entre el carbono y el hierro.

Los espectros EDX ratificaron la presencia predominante de Hierro (Fe) y Oxígeno (O) (fase magnética) junto al Carbono (C) (matriz orgánica).

Se detectaron minerales esenciales (Ca, K, Mg) propios de la biomasa original, lo que potencia el valor del material como fertilizante.

La ausencia de metales pesados confirma que es un producto ecológicamente seguro.

La estructura porosa permite la retención de agua y nutrientes, mientras que la magnetita facilita la recuperación del material mediante magnetismo. El BMF2 destacó ligeramente en pruebas de crecimiento vegetal, sugiriendo que su balance carbono-hierro es óptimo para el desarrollo de cultivos como el chile jalapeño.

4.3 ANALISIS DE MAPEO ELEMENTAL POR EDS

El análisis utiliza el software EDAX Genesis para correlacionar las características morfológicas del SEM con la distribución espacial de los elementos mediante mapas y datos espectrales.

Correlaciones del Mapeo: presenta la composición de Hierro (Fe), Carbono (C), y Oxígeno (O) y Sodio (Na).

El mapeo confirma que las nanopartículas de magnetita están dispersas de manera uniforme sobre la superficie del compuesto.

La señal de carbono forma un fondo distribuido que sigue la estructura porosa del biocarbón, lo que indica que la fase magnética está bien anclada al soporte.

Se evidencian altas concentraciones en los picos del espectro, lo cual es consistente con hallazgos previos sobre residuos de la síntesis.

El mapeo confirma una estructura altamente porosa, lo cual es beneficioso para la retención de los ingredientes del fertilizante.

El análisis sugiere que el porcentaje relativamente bajo de Hierro (Fe) detectado podría ser un factor que contribuye al crecimiento deficiente observado en ciertos cultivos (como el pimiento morrón) durante los ensayos.

Entonces el mapeo elemental visualiza con éxito la naturaleza híbrida del material. No obstante, se recomienda realizar pruebas químicas cuantitativas para complementar estas distribuciones visuales y medir con precisión las concentraciones elementales para optimizar la formulación del fertilizante.

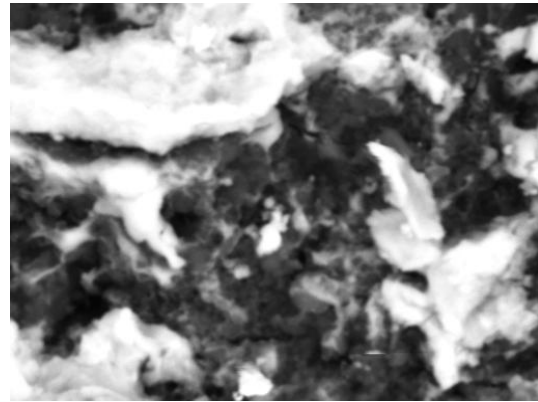
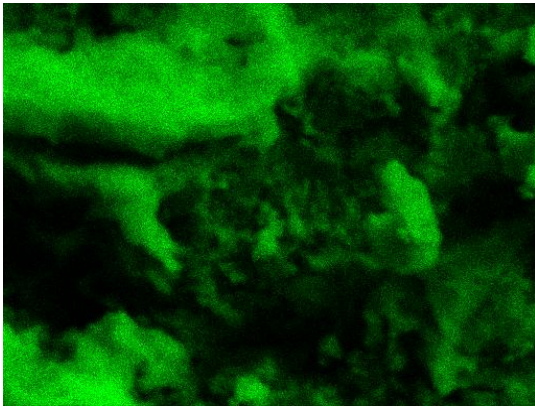


Figura 30: En la figura 30 se observa la presencia de oxígeno que tuvo la muestra que se tomó, nos proporciona la información crítica sobre la distribución espacial de los elementos en el compuesto de biocarbón-magnetita, en este caso el elemento del OXIGENO (O).

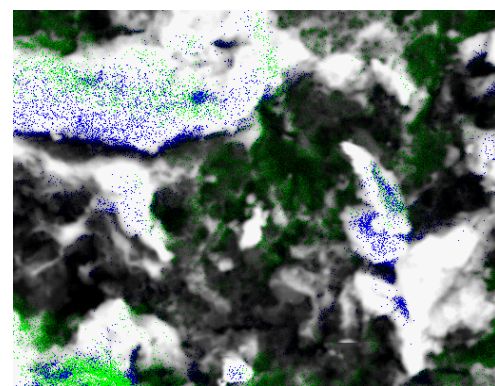
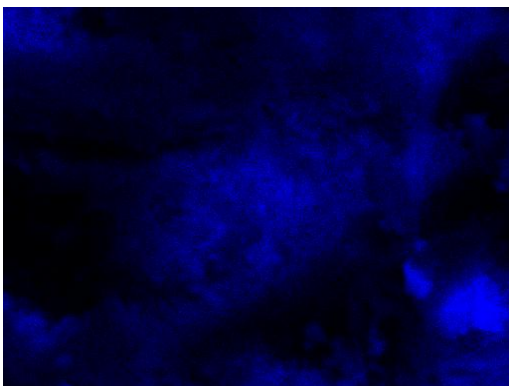


Figura 31: En la figura 31 se observa la presencia de sodio que tuvo la muestra que se tomó, nos proporciona la información crítica sobre la distribución espacial de los elementos en el compuesto de biocarbón-magnetita, en esta figura ya se va presentando el oxígeno de la figura x con la actual que es el SODIO (Na).

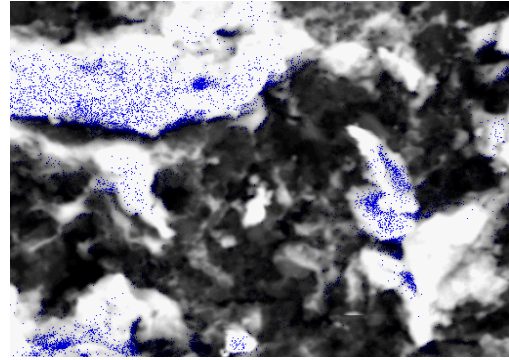
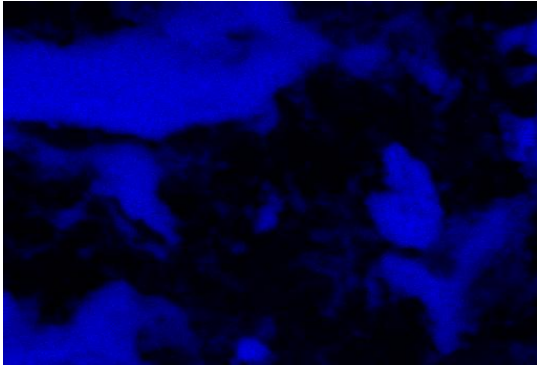


Figura 32: En la figura 32 se observa la presencia de hierro que tuvo la muestra que se tomó, nos proporciona la información crítica sobre la distribución espacial de los elementos en el compuesto de biocarbón-magnetita, en esta figura se observa la presencia de HIERRO (Fe) de la muestra tomada.

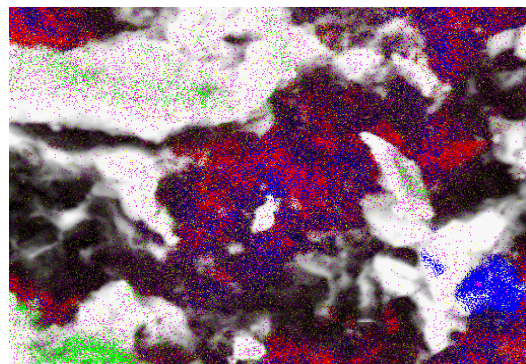
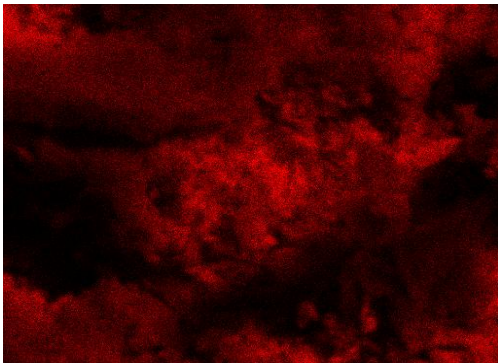


Figura 33: En la figura 33 ya se observa un mapeo más completo, los colores representan los elementos que la muestra nos arrojó: el verde representado el oxígeno, el azul nos representó el elemento de sodio y el rojo el elemento del carbón.

4.4 DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CRECIMIENTO POR TRATAMIENTO, MEDIDOS EN CONDICIÓN DE CHAROLA DE GERMINACIÓN Y MACETA, BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO

El estudio evaluó el uso de un fertilizante sustentable elaborado con nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4) y biocarbón obtenido de cáscara de nuez en el cultivo de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.) bajo condiciones de invernadero. El biocarbón fue producido por pirólisis y funcionalizado (sintetizado) con magnetita para mejorar la retención y disponibilidad de nutrientes.

El experimento, con un diseño completamente al azar, comparó un testigo sin fertilizante, fertilización convencional y el nanocompuesto magnetita-biocarbón, evaluando variables de crecimiento como altura de planta, número de hojas, peso húmedo, peso seco y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

Los resultados mostraron que el fertilizante basado en magnetita-biocarbón mejoró el crecimiento y desarrollo del cultivo, con un desempeño igual, además de favorecer una mayor eficiencia en el uso de nutrientes.

Se concluye que este nanofertilizante, derivado de residuos agroindustriales, es una alternativa viable, ecológica y sustentable para la producción de chile jalapeño bajo condiciones de invernadero, con potencial aplicación en sistemas agrícolas sustentables.

La Figura 34 muestra la altura promedio de las plantas en charolas de germinación, en función de los tratamientos evaluados en tres fechas de medición (25 de junio, 30 de junio y 3 de julio). En todos los tratamientos se observó un incremento progresivo en la altura de las plantas a lo largo del periodo evaluado, registrándose los valores más bajos el 25 de junio y los más altos el 3 de julio.

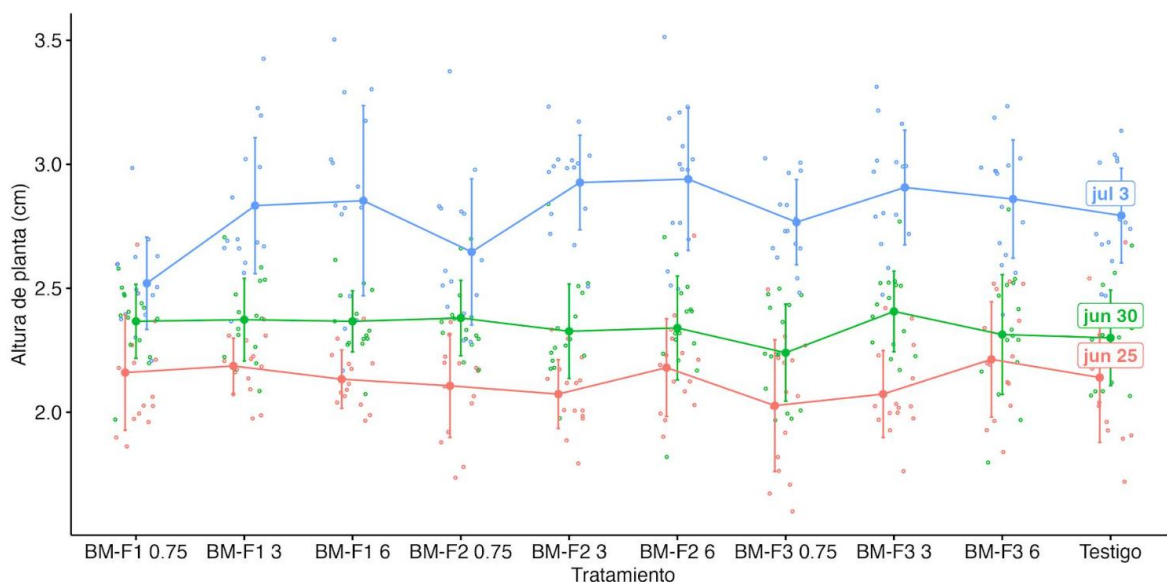


Figura 34: La altura promedio del cultivo de chile jalapeño en charolas de germinación.

Los tratamientos BM-F1 y BM-F2, particularmente en las dosis de 3 y 6, presentaron las mayores alturas promedio en las tres fechas de evaluación. Por el contrario, los tratamientos BM-F3, especialmente en la dosis de 0.75, mostraron valores promedio menores. El tratamiento testigo presentó alturas intermedias en comparación con los tratamientos evaluados. Asimismo, se observó variabilidad en la altura de las plantas dentro de cada tratamiento, la cual fue más evidente en la última fecha de medición.

En la figura 35 se observa que existe un incremento progresivo en la altura conforme avanzan las fechas de evaluación, el crecimiento más alto se registra el 7 de agosto, los tratamientos BM-F2 6 y BM-F1 6 presentan las mayores alturas finales aquí mismo menciono que el tratamiento testigo muestra un crecimiento inferior en comparación con varios tratamientos inoculados.

Las concentraciones intermedias (3 y 6) parecen tener mejor desempeño que 0.75 en la mayoría de los casos, esto sugiere que los tratamientos aplicados influyen en el crecimiento vegetativo de las plántulas.

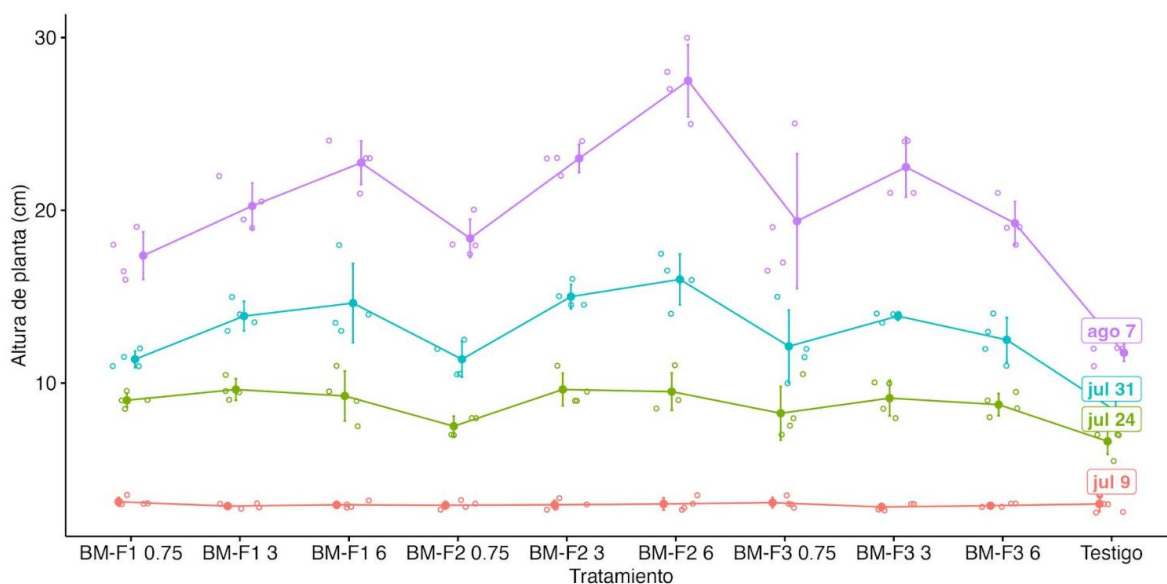


Figura 35: La gráfica muestra la altura de plántulas de chile jalapeño (cm) en macetas, en función de distintos tratamientos (BM-F1 y BM-F3 en diferentes concentraciones), evaluadas en cuatro fechas (9, 24, 31 de julio y 7 de agosto).

Los resultados indican que la aplicación de los tratamientos BM-F1 y BM-F3 tuvo un efecto positivo en el crecimiento en altura de las plántulas de chile jalapeño durante la etapa en maceta. El incremento progresivo observado en la figura 31 entre fechas es consistente con el desarrollo vegetativo esperado en esta fase fenológica.

Se destaca que los tratamientos con concentraciones más altas (especialmente 6) promovieron mayor crecimiento en comparación con las dosis más bajas y con el testigo. Esto podría indicar una respuesta dosis-dependiente, donde una mayor concentración favorece procesos fisiológicos como:

- Mejor absorción de nutrientes
- Mayor desarrollo radicular
- Estimulación hormonal (posible producción de fitohormonas si se trata de biofertilizantes o microorganismos promotores de crecimiento)

El menor crecimiento observado en el testigo sugiere que el sustrato por sí solo no proporcionó las condiciones óptimas en comparación con los tratamientos aplicados.

Los tratamientos aplicados influyeron positivamente en el crecimiento en altura de las plántulas de chile jalapeño en etapa de maceta. Las concentraciones más altas, particularmente en los tratamientos BM-F2 6 y BM-F1 6, mostraron el mayor efecto estimulante en comparación con el testigo.

La figura 36 muestra el número de hojas por planta en plántulas de chile jalapeño cultivadas en charola de germinación bajo diferentes tratamientos (BM-F1, BM-F2, BM-F3 en distintas concentraciones) y un testigo. En general, el número de hojas se mantuvo en un rango aproximado de 3 a 5 hojas por planta en la mayoría de los tratamientos evaluados.

Se observa que en la Figura 36 que algunos tratamientos, particularmente en ciertas dosis de BM-F1 y BM-F3, presentan valores ligeramente superiores respecto al testigo, con promedios cercanos o por encima de 4 hojas por planta, algunos niveles de BM-F2 muestran una ligera disminución en el número promedio de hojas, situándose más cerca de 3–4 hojas por planta.

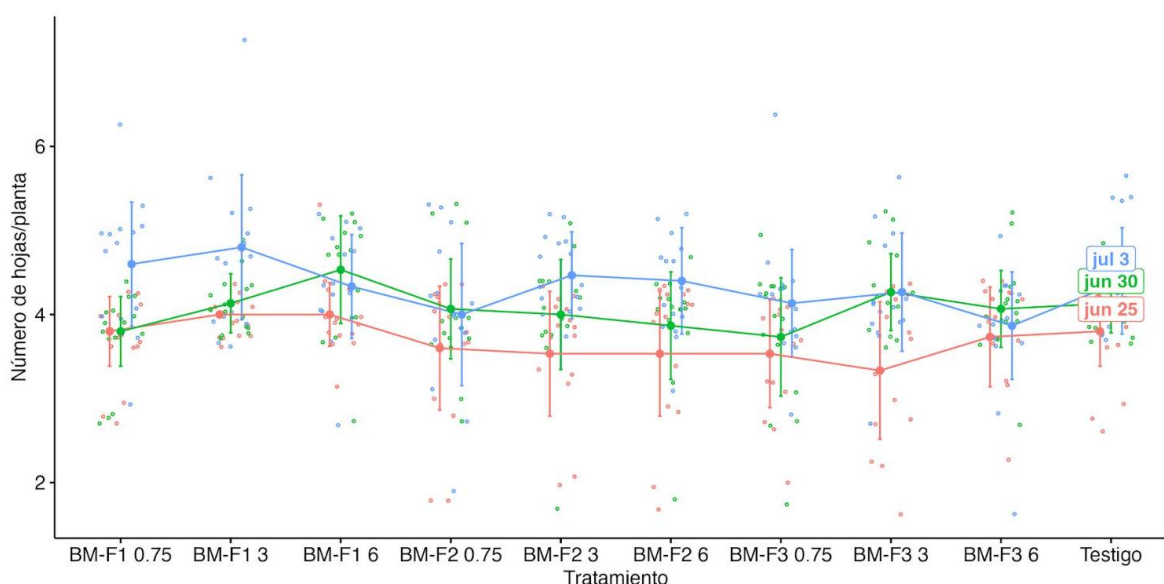


Figura 36: La figura muestra el número de hojas por planta en plántulas de chile jalapeño cultivadas en charola de germinación bajo diferentes tratamientos (BM-F1, BM-F2, BM-F3 en distintas concentraciones) y un testigo.

Asimismo, la dispersión de los datos indica variabilidad entre plantas dentro de un mismo tratamiento, lo que sugiere diferencias individuales en la respuesta al manejo aplicado.

Los resultados sugieren que los tratamientos aplicados no generaron cambios drásticos en el número de hojas por planta durante la etapa de desarrollo en charola, aunque sí se observan ligeras tendencias. Algunos tratamientos, especialmente aquellos asociados a BM-F1 y BM-F3 en ciertas concentraciones, parecen favorecer moderadamente la emisión foliar en comparación con el testigo.

El número de hojas es un indicador importante del vigor vegetativo, ya que se relaciona con la capacidad fotosintética y el crecimiento inicial de la planta. Las pequeñas variaciones observadas podrían indicar que ciertos tratamientos promueven un desarrollo foliar ligeramente más activo, aunque el efecto no parece ser marcadamente superior en todos los casos.

Al comparar la gráfica anterior con la presente en macetas (Figura 37), se observa una diferencia clara asociada al momento de evaluación. En la primera gráfica, el número de hojas por planta se mantuvo en valores relativamente bajos (aproximadamente entre 3 y 5 hojas), lo cual corresponde a una etapa más temprana del desarrollo de las plántulas. En cambio, en esta segunda evaluación se aprecia un incremento notable en el número de hojas en todos los tratamientos y fechas, alcanzando valores considerablemente mayores y evidenciando el avance en el crecimiento vegetativo del cultivo.

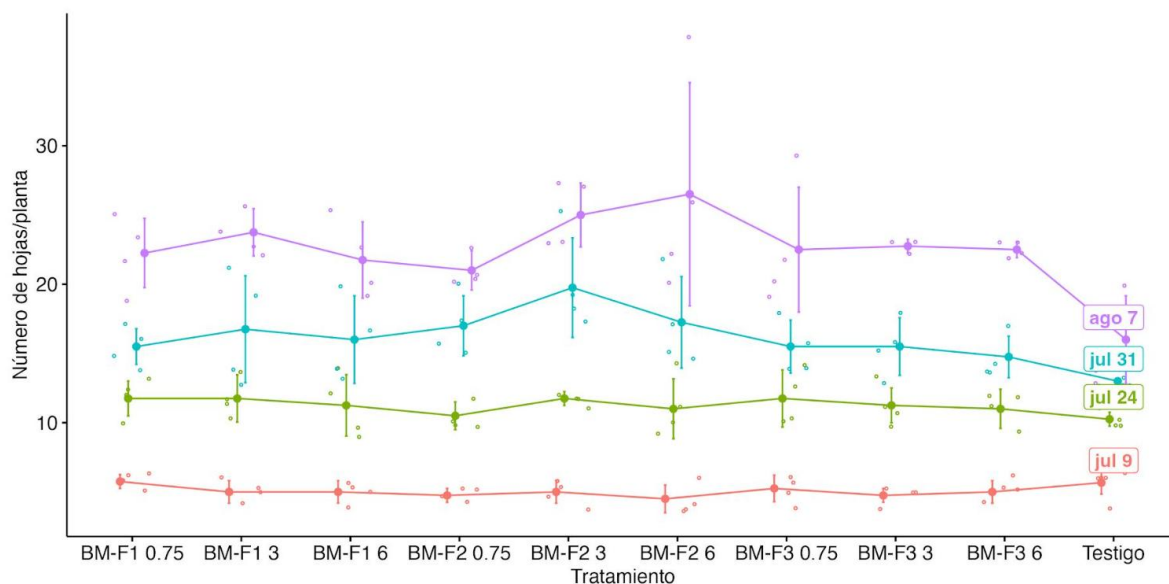


Figura 37: El número de hojas por planta en plántulas de chile jalapeño cultivadas en maceta bajo diferentes tratamientos (BMF1, BMF2, BMF3 en distintas concentraciones) y un testigo.

Como se observa en la (Figura 37) del aumento general en la cantidad de hojas, en esta segunda gráfica se distinguen con mayor claridad las diferencias entre fechas de medición. Las evaluaciones más recientes muestran consistentemente los valores más altos de número de hojas por planta, lo que indica una acumulación progresiva del desarrollo foliar conforme transcurre el tiempo, las fechas más tempranas presentan valores menores, confirmando el patrón esperado de crecimiento gradual en la etapa de vivero.

En relación con los tratamientos, mientras que en la primera gráfica (Figura 36) las variaciones eran pequeñas y los valores se concentraban en un rango muy estrecho, en esta segunda evaluación (Figura 37) las diferencias entre tratamientos se vuelven más visibles debido al mayor desarrollo de las plantas. Algunos tratamientos tienden a mantener valores superiores en ciertas fechas, lo que sugiere que su efecto se manifiesta con mayor claridad conforme las plántulas avanzan en edad.

La comparación entre ambas gráficas indica que el número de hojas por planta aumenta de forma sostenida con el tiempo, y que las diferencias entre tratamientos

se aprecian mejor en etapas más avanzadas del crecimiento (Figura 37). Esto sugiere que los efectos de los tratamientos aplicados pueden ser acumulativos y hacerse más evidentes conforme progresa el desarrollo vegetativo de las plántulas de chile jalapeño en charola.

En la gráfica de peso fresco (Figura 38), las letras colocadas sobre cada barra corresponden a los grupos formados por la prueba de comparación de medias (Tukey, $p \leq 0.05$). Tratamientos que comparten la misma letra no presentan diferencias estadísticas significativas entre sí; aquellos que no comparten letras sí difieren significativamente.

Se detectaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos para la variable peso fresco ($p \leq 0.05$). El tratamiento BM-F2 6 registró el mayor peso promedio, ubicándose en el grupo estadístico superior (d), seguido por BM-F2 3 (cd), sin diferencias significativas entre ambos. Los tratamientos BM-F1 0.75, BM-F1 6, BM-F3 0.75, BM-F3 3 y BM-F3 6 se agruparon en un nivel intermedio (bc), mostrando valores estadísticamente similares. Por su parte, BM-F1 3 y BM-F2 0.75 se ubicaron en el grupo b, con valores menores, pero sin diferir de los tratamientos intermedios. El testigo presentó el menor peso fresco y fue estadísticamente diferente del resto de los tratamientos (a).

Los resultados indican que el tratamiento BM-F2 en dosis 6 promovió la mayor acumulación de biomasa fresca en las plántulas de chile jalapeño, mostrando diferencias significativas respecto al testigo y a la mayoría de los tratamientos, lo que sugiere un efecto favorable en el crecimiento vegetativo inicial.

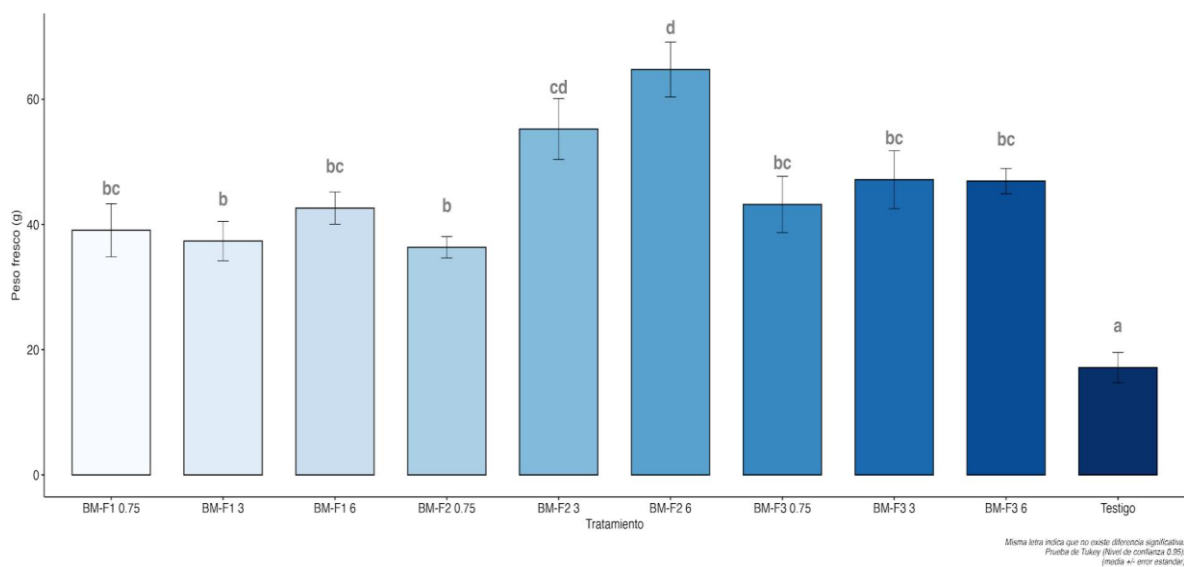


Figura 38: Interpretación de diferencias estadísticas significativas (peso fresco por tratamiento).

En la Figura 39 presenta la interpretación de diferencias estadísticas significativas (Peso seco por tratamiento), las letras sobre cada barra corresponden a los grupos formados por la prueba de comparación de medias (Tukey, $p \leq 0.05$). La interpretación es la siguiente: tratamientos que comparten al menos una letra no presentan diferencias significativas, mientras que aquellos que no comparten letras sí difieren estadísticamente.

En la figura 39 se observan diferencias estadísticas significativas entre tratamientos para la variable peso seco ($p \leq 0.05$). El tratamiento BM-F2 6 presentó el mayor valor promedio, ubicándose en el grupo estadístico superior (d), seguido de BM-F2 3 (cd), sin diferencias significativas entre ambos. Los tratamientos BM-F1 3, BM-F1 6, BM-F3 0.75, BM-F3 3 y BM-F3 6 se agruparon en un nivel intermedio (bc), mostrando valores similares entre sí. BM-F2 0.75 se ubicó en el grupo b, mientras que BM-F1 0.75 presentó un comportamiento intermedio (ab). El testigo registró el valor más bajo y fue estadísticamente diferente del resto de los tratamientos (a).

Los resultados indican que la aplicación del tratamiento BM-F2, particularmente en la dosis 6, favoreció significativamente la acumulación de biomasa seca en las plantas de chile jalapeño. En contraste, el testigo mostró el menor desarrollo, lo que confirma el efecto positivo de los tratamientos sobre el crecimiento vegetal.

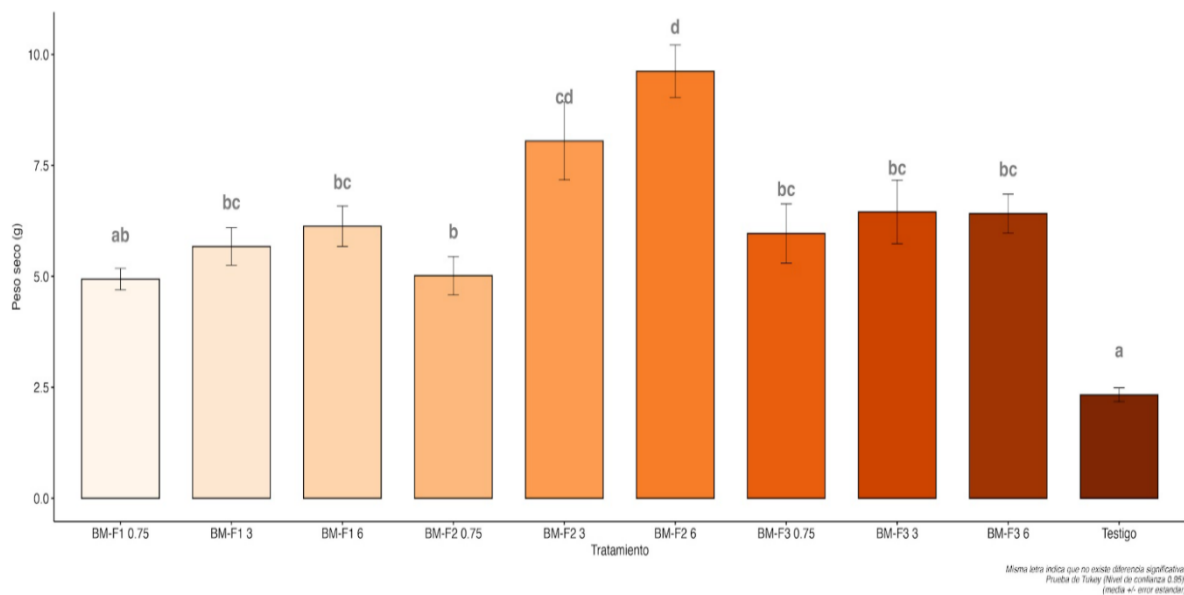


Figura 39: Interpretación de diferencias estadísticas significativas (Peso seco por tratamiento), las letras sobre cada barra corresponden a los grupos formados por la prueba de comparación de medias (Tukey, $p \leq 0.05$).

La Figura 40 muestra la distribución de los valores de la escala de color HUE del follaje para los distintos tratamientos (T1–T9) y el testigo durante el último muestreo en plantas cultivadas en maceta. Cada curva representa la densidad de los valores registrados dentro de cada tratamiento, mientras que la línea vertical central indica el valor promedio aproximado.

Esta representación permite una comparación visual de la coloración del follaje entre tratamientos. En general, los valores se concentran en un rango aproximado de 70 a 90 en la escala HUE. Los valores ubicados hacia la derecha de la gráfica corresponden a tonalidades más verdosas, mientras que los situados hacia la izquierda reflejan tonalidades relativamente menos intensas dentro del espectro evaluado.

Asimismo, la amplitud de las curvas sugiere variabilidad en la coloración del follaje entre plantas dentro de un mismo tratamiento. Sin embargo, esta figura únicamente muestra diferencias visuales en el color y no permite establecer de manera directa una relación con el estado fisiológico de las plantas. Aunque la coloración podría

estar asociada de forma potencial con el NDVI, en este estudio no se realizó un análisis de correlación que permita confirmarlo.

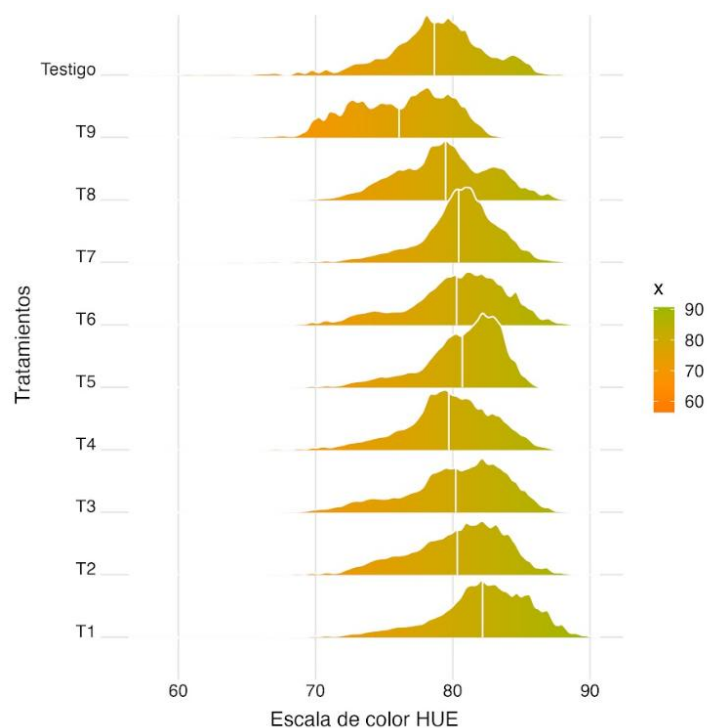
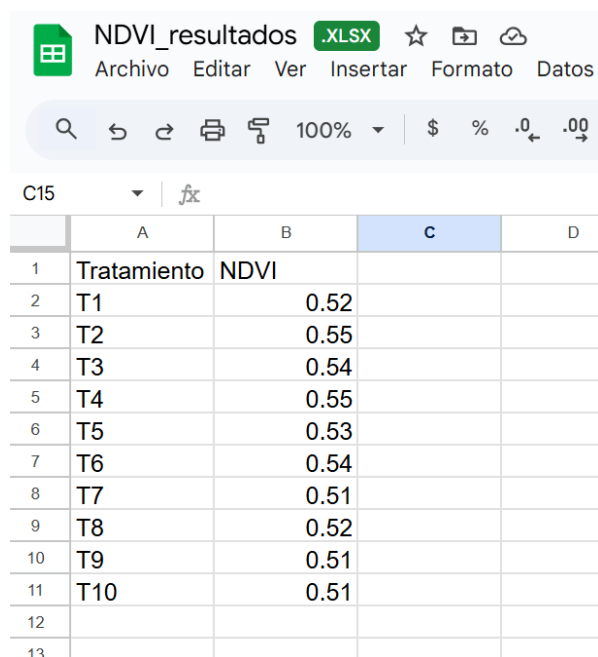


Figura 40: Comparativa visual del color del follaje de las plantas en maceta.

A partir de los valores promedio de NDVI obtenidos en el último muestreo, se observa que los tratamientos presentaron valores muy cercanos entre sí, con un rango de 0.51 a 0.55 como se muestra en la Figura 41. Los tratamientos T2 y T4 registraron los valores más altos (0.55), seguidos por T3 y T6 (0.54), mientras que T7, T9 y T10 mostraron los valores más bajos (0.51). En general, estos resultados indican una condición fisiológica relativamente homogénea del cultivo, sin contrastes marcados en la actividad fotosintética entre tratamientos.

Al relacionar estos datos con la distribución de la escala HUE mostrada en la Figura 40, se aprecia que la mayoría de los tratamientos concentran sus valores en tonalidades verdes similares (70–90), lo cual coincide con los niveles de NDVI obtenidos. Dado que valores más altos de NDVI suelen asociarse con mayor densidad y vigor del follaje, la similitud entre tratamientos sugiere que las plantas mantuvieron un estado vegetativo comparable durante el periodo evaluado.



	A	B	C	D
1	Tratamiento	NDVI		
2	T1	0.52		
3	T2	0.55		
4	T3	0.54		
5	T4	0.55		
6	T5	0.53		
7	T6	0.54		
8	T7	0.51		
9	T8	0.52		
10	T9	0.51		
11	T10	0.51		
12				
13				

Figura 41: Gráfica sobre los valores de NDVI obtenidos en el último muestreo, donde los tratamientos presentan los valores con un rango de 0.51 a 0.55

Los tratamientos con NDVI ligeramente superiores (T2, T4, T3 y T6) presentan valores que podrían indicar una mayor intensidad en la actividad fotosintética o un follaje más denso; sin embargo, esta diferencia es mínima frente al resto de los tratamientos. Esta tendencia es consistente con la figura de HUE, donde no se observan desplazamientos marcados hacia tonalidades notablemente más verdes en tratamientos específicos, sino más bien distribuciones amplias y relativamente superpuestas.

Por otra parte, los tratamientos con los valores más bajos de NDVI (T7, T9 y T10) coinciden con distribuciones de color que no difieren sustancialmente del resto, lo que refuerza la idea de que las variaciones en el verdor del follaje fueron leves. Esto sugiere que, aunque el color puede reflejar el estado general de la planta, en este caso las diferencias entre tratamientos no fueron lo suficientemente pronunciadas como para generar contrastes claros en el índice de vegetación.

En conjunto, la correspondencia entre la homogeneidad de los valores NDVI y la similitud en las tonalidades HUE indica que los tratamientos evaluados produjeron respuestas fisiológicas comparables en las plantas cultivadas en maceta durante el

último muestreo. Esto podría interpretarse como una ausencia de efectos marcadamente diferenciados de los tratamientos sobre el vigor vegetativo en esta etapa del cultivo.

CAPITULO V

CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos en las diferentes variables evaluadas (altura de planta, número de hojas, biomasa fresca y seca, e índice de vegetación NDVI) demuestran que la aplicación de nanocompuestos de magnetita–biocarbón de cáscara de nuez (BMF) tuvo un efecto positivo y consistente sobre el desarrollo vegetativo de plántulas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.) durante la etapa de vivero.
- Entre los tratamientos evaluados, el correspondiente al tamaño de partícula intermedio (BMF2: 0.18–0.38 mm), particularmente en la dosis de 6 g/kg, destacó de manera sistemática como el más eficiente en la mayoría de las variables agronómicas. Este tratamiento presentó los mayores valores de biomasa fresca y seca, diferencias estadísticas significativas respecto al testigo, y una tendencia superior en número de hojas, vigor vegetativo. La superioridad de este tratamiento sugiere que el tamaño de partícula intermedio favorece un balance adecuado entre área superficial reactiva, retención de humedad, disponibilidad nutrimental y aireación del sustrato.
- El testigo, por su parte, presentó los valores más bajos en prácticamente todas las variables evaluadas y fue estadísticamente inferior en biomasa fresca y seca, confirmando el efecto positivo de los nanocompuestos BMF sobre el crecimiento inicial del cultivo.
- Los resultados confirman que el uso de nanofertilizantes a base de magnetita anclada a biocarbón de cáscara de nuez pecana constituye una alternativa sustentable y eficaz para mejorar el establecimiento y vigor vegetativo del chile jalapeño en etapas tempranas. El tamaño de partícula intermedio (BMF2) optimiza la reactividad superficial del material y su interacción con el sustrato y la raíz, favoreciendo la absorción de nutrientes y el desarrollo fisiológico de las plántulas.
- Por lo tanto, se concluye que el tratamiento BMF2 a 6 g/kg representa la mejor combinación evaluada, al promover incrementos significativos en

crecimiento, biomasa y vigor vegetal, respaldando su potencial como fertilizante de uso sustentable. Estos hallazgos contribuyen al aprovechamiento de residuos agrícolas dentro de un enfoque de economía circular y posicionan a los nanocompuestos magnetita–biocarbón como una tecnología viable para fortalecer sistemas de producción hortícola más eficientes, ecológicos y accesibles para la agricultura de pequeña y mediana escala en México.

RECOMENDACIÓN:

- ✓ Los resultados obtenidos respaldan el potencial del biocarbón enriquecido con magnetita a base de cáscara de nuez pecana como una alternativa sustentable para mejorar el crecimiento inicial del chile jalapeño.
- ✓ Por ello, se recomienda continuar con el desarrollo y evaluación de este tipo de insumos agrícolas innovadores, orientados a incrementar la eficiencia productiva y reducir el impacto ambiental de la fertilización convencional.

REFERENCIAS

- 1) Aguilar-Meléndez, A. 2004. Ethnobotany, classification, and distribution of *Capsicum annuum* L. in México. En Pozo C., O. (ed) Primera Convención Mundial del Chile 2004, Memorias. León, Gto., México. pp. 419-421.
- 2) Aguilar-Rincón, V. H., T. Corona Torres, P. López López, L. Latournerie Moreno, M. Ramírez Meraz, H. Villalón Mendoza y J. A. Aguilar Castillo. (2010). Los chiles de México y su distribución. SINAREFI, Colegio de Postgraduados, INIFAP, IT-Conkal, UANL, UAN. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 114 p.
- 3) Azimi Reyhaneh, Farzam Mohammad, Feizi Hassan and Azimi Amin. (2014). Interaction of SiO₂ Nanoparticles with Seed Prechilling on Germination and Early Seedling Growth of Tall Wheatgrass (*Agropyron Elongatum* L.). Polish Journal of Chemical Technology. 10.2478/pjct-2014-0045.
- 4) Beegum Sahila and Das Saurav. (2022). Nanosensors in agriculture. Agricultural Nanobiotechnology. 10.1016/B978-0-323-91908-1.00012-2.
- 5) Begna Temesgen. (2021). Impact of drought stress on crop production and its management options. International Journal of Research in Agronomy. 4. 66-74. 10.33545/2618060X.2021.v4.i2a.103.
- 6) Bewley, J.D., Bradford, K.J., Hilhorst, H.W.M., Nonogaki, H., 2013. Seeds Physiology of Development, Germination and Dormancy. 3rd Edition. Springer, New York, NY. Briat, J.-F., Curie, C., Gaymard, F., 2007. Iron utilization and metabolism in plants. Curr. Opin. Plant Biol. 10, 276–282. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pbi.2007.04.003>.
- 7) Ertuğ Mehmet and Yazıcılar Büşra. (2023). CaO nanoparticle enhances the seedling growth of *Onobrycis viciifolia* under drought stress via mannitol use. Biologia. 78. 3. 10.1007/s11756-023-01313-w.
- 8) Faraji Javad & Sepehri, Ali. (2019). Ameliorative effects of TiO₂ nanoparticles and sodium nitroprusside on seed germination and seedling growth of wheat

- under PEG-stimulated drought stress. *Journal of Seed Science*. 41. 309-317. 10.1590/2317-1545v41n3213139.
- 9) Gong, Z., Xiong, L., Shi, H., Yang, S., Herrera-Estrella L.R., Xu G., Chao D.-Y., Li J., Wang P.-Y., Qin, F. (2020). Planta abiótica Respuesta al estrés y eficiencia en el uso de nutrientes. *Sci. China Life Sci.* 63, 635–674.
 - 10) Hasanuzzaman Mirza, Nahar Kamrun, Fujita Masayuki, Ahmad Parvaiz, Chandna Ruby, Majeti Prasad and Ozturk Munir. (2014). Potential use of halophytes to remediate saline soils. *BioMed Research International*. 10.1007/978-1-4614-6108-1_6.
 - 11) Kalia A. and Kaur H (2019). Nano-biofertilizers: Harnessing dual benefits of nano-nutrient and bio-fertilizers for enhanced nutrient use efficiency and sustainable productivity. In *Nanoscience for sustainable agriculture*. Springer. pp. 51-73.
 - 12) Kaushal Manoj and Wani Suhas. (2017). *Nanosensors: Frontiers in Precision Agriculture*. Springer Nature Singapore Pte Ltd 10.1007/978-981-10-4573-8_13.
 - 13) Koca Fatih, Nadaroglu Hayrunnisa, Kaymak Haluk, Kaska Mustafa and Alayli Azize. (2021). Potential Effects of CaO Nanoparticles on Germination of Common Bean Under Salinity Stress. *Proceedings of the 4th International Symposium on Advanced Materials and Nanotechnology*. 1-3.
 - 14) Lahuta Lesław, Szablińska-Piernik Joanna, Glowacka Katarzyna, Stałanowska Karolina, Railean Viorica, Horbowicz Marcin, Pomastowski Paweł and Buszewski Bogusław. (2022). The Effect of Bio-Synthesized Silver Nanoparticles on Germination, Early Seedling Development, and Metabolome of Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Molecules*. 27. 2303. 10.3390/molecules27072303.
 - 15) Liu, R., and Lal R. (2015). Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic production. *Sci. Total, Environ.* 514, 131–139.
 - 16) López-Martínez Guadalupe, Ruiz-Torres Norma, Diaz-Barriga-Castro Enrique, Lira-Saldivar Ricardo, López-Hernández Isaías, Luna-Anguiano

- Jesús y Flores-Hernández Eduardo. (2023). Efecto de nanopartículas de hidroxiapatita en el desarrollo y germinación de (*Capsicum annuum* L.).
- 17) Ma, Yali, Zhang Jinghua, Li Xiaorong, Zhang Shiyue, and Lan Haiyan. (2016). Effects of environmental stress on seed germination and seedling growth of *Salsola ferganica* (Chenopodiaceae). *Acta Ecologica Sinica*. 36. 456-463. 10.1016/j.chnaes.2016.09.008.
 - 18) Magdaleno-García, Guadalupe & Méndez-López, Alonso. (2023). Nanotecnología en la agricultura: pequeñas soluciones para grandes desafíos. *Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.* 1. 59-64.
 - 19) Manjunatha S. B., Biradar D., and Aladakatti Yallappa. (2016). Nanotechnology and its applications in agriculture: A review. *Journal of Farm Sciences*. 29. 1-13.
 - 20) Nazeer Ayesha, Ahmad Faisal and Ahmad Shamim. (2023). Nanofertilizers in Agriculture. Targeted Delivery of Nanopesticides and Nanofertilizers in Sustainable Agricultural Farming. 10.1007/978-3-031-41333-9_5.
 - 21) Nejatizadeh, Fatemeh. (2021). Effect of silver nanoparticles on salt tolerance of *Satureja hortensis* L. during in vitro and in vivo germination tests. *Heliyon*. 7. e05981. 10.1016/j.heliyon. 2021.e05981.
 - 22) Oshunsanya Suarau, Nwosu Nkem, Li Yong. (2019). Abiotic Stress in Agricultural Crops Under Climatic Conditions. *Sustainable Agriculture, Forest and Environmental Management*. 10.1007/978-981-13-6830-1_3.
 - 23) Pedraza Robles Laura y Gómez Gómez Alma. (2008). Análisis exploratório del mercado y la comercialización de chile jalapeño (*C. annuum*, var. aviculare Dierb.) en México. Tecsisistecatl.
 - 24) Ramírez-Meraz, M., O. Pozo-Campodónico y L. A. Rodríguez del Bosque. (2003). Tecnología para inducir la germinación en chile jalapeño. En Rodríguez del Bosque, L. A. (ed). *Memoria del Primer Simposio de Chile Piquín*. INIFAP. pp. 35-36.
 - 25) Reyes-Díaz Marjorie, Khan Amanullah, Panfilova Olga, Seguel Alex, Meier Sebastian, Beithou N., Wan Chunpeng and Horvatinec Jelena. (2022). Salt

- Stress in Plants and Mitigation Approaches. *Plants*. 11. 717. 10.3390/plants11060717.
- 26)Ruiz-Torres, Norma & García López, Josué. (2021). Synthesis of hydroxyapatite nanoparticles and its effect on *Raphanus sativus* seedlings. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 8. 1-12. 10.19136/era. a8n1.2747.
- 27)Samadi Niloofar, Yahyaabadi Sima and Rezayatmand Zahra. (2014). Effect of TiO₂ and TiO₂ nanoparticle on germination, root and shoot length and photosynthetic pigments of *Mentha piperita*. *Int. J. Plant Soil Sci*. 3. 408-418.
- 28)Soni Kiran, Sharma Yashpal, Sharma Shalini, Sharma Amita, Rani Amisha, Rathi Abhinav, Kapoor Dr and Naik S. Balaji. (2024). Nanobiostimulants and Plant Secondary Metabolites. *Biostimulants*. 10.1007/978-3-031-68138-7_12.
- 29)Upadhayay V. K., Chitara M. K., Mishra D., Jha M. N., Jaiswal A., Kumari G., Ghosh S., Patel V. K., Naitan M. G., Singh A. K., and Pareek N. (2023). Synergistic impact of nanomaterials and plant probiotics in agriculture: A tale of two-way strategy for long-term sustainability. *Frontiers in Microbiology*. 14. 1133968.