

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



NANOPARTÍCULAS DE HIDROXIAPATITA COMO FERTILIZANTE EFICAZ EN
LA CALIDAD DEL CULTIVO DE GIRASOL

Tesis

Que presenta OSCAR EMMANUEL GOMEZ GARCIA
como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA

Torreón, Coahuila

Diciembre 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



NANOPARTÍCULAS DE HIDROXIAPATITA COMO FERTILIZANTE EFICAZ EN
LA CALIDAD DEL CULTIVO DE GIRASOL

Tesis

Que presenta OSCAR EMMANUEL GOMEZ GARCIA
como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA



Dr. Eduardo Aron Flores Hernández
Director UAAAN



Dra. Mercedes Georgina Ramírez Aragón
Director externo

Torreón, Coahuila

Diciembre 2024

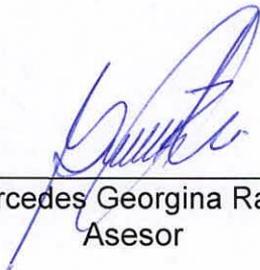
NANOPARTÍCULAS DE HIDROXIAPATITA COMO FERTILIZANTE EFICAZ EN
LA CALIDAD DEL CULTIVO DE GIRASOL

Tesis

Elaborada por OSCAR EMMANUEL GOMEZ GARCIA como requisito parcial
para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Producción Agropecuaria
con la supervisión y aprobación del Comité de Asesoría



Dr. Eduardo Aaron Flores Hernández
Director de Tesis



Dra. Mercedes Georgina Ramírez Aragón
Asesor



Dr. Rubén López Salazar
Asesor



Dr. Alejandro Moreno Reséndiz
Asesor



Dra. Dalia Ivette Carrillo Moreno
Jefe del Departamento de Postgrado



Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de Postgrado

AGRADECIMIENTOS

A mis compañeras, Monserrat Pérez Esquivel y Guadalupe Flores Salas por estar para mí, por su acompañamiento en esta etapa, por las risas y su confianza, hicimos un gran equipo juntos.

A mis asesores, Eduardo Aarón Flores Hernández, Mercedes Georgina Ramírez Aragón y Rubén López Salazar por guiarme e instruirme con sus conocimientos.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por la beca otorgada para realizar la maestría.

DEDICATORIA

A Dios, por darme la salud y la fuerza necesaria para continuar con mi preparación profesional.

A mi madre, Ma. Luisa García Márquez por estar conmigo y enseñarme que nunca tengo que rendirme.

A mis compañeras, Monserrat Pérez Esquivel y Guadalupe Flores Salas vivir esta etapa con ustedes hizo mucho mejor el camino, gracias por su tiempo, apoyo en los trabajos y esfuerzo para concluir juntos esta aventura.

A mi asesora, Mercedes Georgina Ramírez Aragón por su motivación y dedicación para ayudarme a que este trabajo rindiera frutos.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
LISTA DE CUADROS	iv
LISTA DE FIGURAS	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
Producción agrícola	3
Evolución de la agricultura y tecnología	3
Impacto socioeconómico actual de la agricultura	4
Agricultura y sostenibilidad ambiental	4
Antecedentes históricos de la agricultura	5
Origen de la agricultura	6
Evolución de la agricultura	6
Revolución agrícola moderna	6
Factores bióticos y abióticos	7
Factores bióticos en el sistema	8
Interacción entre factores bióticos y abióticos	9
Agroquímicos	9
Contaminación del agua, suelo y pérdida de biodiversidad	10
Impacto en la salud humana	11
Producción de alimentos	11
Métodos de producción de alimentos	11
Desafíos en la producción de alimentos	12
Alternativas en la producción de alimentos	13
Tecnología agrícola	14
Desafíos en la implementación de la tecnología agrícola	15
Nanotecnología	16
Antecedentes de la nanotecnología	16
Aplicaciones en la agricultura	16
Nanobiotecnología vegetal	17
Nanopartículas de hidroxiapatita	18
Propiedades fisicoquímicas de las nanopartículas de hidroxiapatita	18
Síntesis de nanopartículas de hidroxiapatita	19
Aplicación de las nanopartículas de hidroxiapatita	19
Desafíos y perspectivas futuras	20
Girasol (<i>helianthus annuus</i>)	21
Los usos como alimento	22
Importancia del cultivo	23

Fertilizantes	24
Biofertilizante	25
III. MATERIALES Y MÉTODOS	26
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
V. CONCLUSIONES	37
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

ÍNDICE DE CUADROS

		Pág.
Cuadro 1	Composición nutricional del vermicompost (VC)	27
Cuadro 2	Resultados del efecto sobre variables agronómicas de las dosis de nanopartículas de hidroxiapatita aplicadas.	32
Cuadro 3	Efecto de las nanopartículas de hidroxiapatita sobre variables fitoquímicas	34

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1	Factores principales que restringen la eficiencia de la entrega de nanopartículas a las plantas.	31
Figura 2	Altura en plantas del cultivo de girasol en diferentes tratamientos en suelo	32
Figura 3	Diámetro del tallo y diámetro de la cabeza en el cultivo de girasol por diferentes tratamientos utilizados en el suelo.	33
Figura 4	TPC y FT en aceite de girasol para diferentes tratamientos en suelo	34
Figura 5	AOX en aceite de girasol para diferentes tratamientos en suelo	35

RESUMEN

Nanopartículas de hidroxiapatita como fertilizante eficaz en la calidad del cultivo de girasol

Oscar Emmanuel Gomez Garcia

Para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Producción Agropecuaria
Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Dr. Eduardo Arón Flores Hernández
Director de Tesis

La nanotecnología es la capacidad de manipulación de materiales que miden 100 nm o menos en ámbitos atómicos o moleculares, y ha sido centro de aplicación en varios departamentos, entre ellos, surge el interés por las perspectivas que contemplen usar la técnica en la agricultura. Las variables investigadas se centraron en la altura de la planta, el diámetro del tallo y la cabeza, el total de los compuestos fenólicos, el contenido de flavonoides y la actividad antioxidante. Los resultados se realizaron en términos de la altura de la planta, la cual fue tratada con lombricompost e independientemente del biofertilizante y del testigo, así para los mencionados anteriores, se obtuvieron valores de, 299.6, 289.4, 271.8 y 258.6 cm, correspondientemente. Para los insumos fitoquímicos, los datos se reflejan de la presente forma, 17.9-35.4 mg GAE mL⁻¹ para el contenido de compuestos fenólicos y 29.8-60.7 mg QE mL⁻¹ para el contenido de flavonoides. Su intención es evaluar el uso de hidroxiapatita nanopartículasclusionesin el cultivo de girasol y su efecto en los principales antioxidantes encontrados en el aceite de girasol.

Palabras clave: Metabolitos secundarios, Agronomía, Suelo, Fertilizantes,
Compuestos bioactivos.

ABSTRACT

Hydroxyapatite nanoparticles as an effective fertilizer in sunflower crop quality

Oscar Emmanuel Gomez Garcia

To obtain the degree of Master of Science in Agricultural Production
Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Dr. Eduardo Arón Flores Hernández
Thesis director

Nanotechnology involves the manipulation of materials at the atomic or molecular level, particularly those smaller than 100 nm in at least one dimension. Its applications span various fields, with increasing attention being paid to its potential in agriculture. The evaluated variables included plant height, stem diameter, head diameter, total phenolic compounds, flavonoid content, and antioxidant capacity. The results indicated that for the plant height variable, the best treatment was vermicompost, followed by chemical fertilizer, biofertilizer, and the control, with values ranging between 299.6, 289.4, 271.8, and 258.6 cm, respectively. Regarding the phytochemicals properties, the results reported in this research for the different soil treatments yielded data ranging from 17.9 to 35.4 mg GAE mL⁻¹ for TPC and 29.8 to 60.7 mg QE mL⁻¹ for FT. The focus of this research lies in examining the impact of hydroxyapatite nanoparticles (NPs) on sunflower cultivation, particularly on the antioxidants found in sunflower oil.

Keywords: Secondary metabolites, Agronomy, Soil, Fertilizers, Bioactive compounds.

INTRODUCCIÓN

En todas partes del mundo, la agricultura sigue siendo uno de los pilares de la economía, garantizando la seguridad alimentaria de la población y la disponibilidad de materias primas, también juega un papel crucial en la estabilización de muchas comunidades rurales (FAO, 2021). Al mismo tiempo, la agricultura se ha modernizado a través de la agricultura de precisión, el uso de drones y sensores remotos, la inteligencia artificial y otras prácticas que buscan maximizar la cantidad de cultivo creciendo con la misma cantidad de recursos utilizados y el menor daño posible al medio ambiente (Zhang et al., 2021). La aplicación constante de abonos y pesticidas influye en la composición del suelo y en la disminución de su fertilidad a largo plazo; la acumulación de ciertas sustancias tóxicas descompone la microfauna y la estructura del suelo, reducen la viabilidad de nutrientes y agua, lo cual tiene un impacto directo sobre la producción agrícola (Chen et al., 2021). La nanotecnología se ha propuesto como una herramienta revolucionaria en múltiples industrias, y la agricultura no es la excepción, al permitir la manipulación de materiales a escala nanométrica, dicha tecnología ofrecería nuevas oportunidades para hacer más eficientes las prácticas agrícolas a través de la nutrición y protección de cultivos, mejoras en la calidad del suelo y la seguridad alimentaria, entre otros; como resultado, si se implanta con éxito, la nanotecnología en la agricultura abordará múltiples desafíos globales, incluidos el aumento de la demanda de alimentos, el cambio climático y la necesidad de disminuir el uso de agroquímicos convencionales (Khot et al., 2012).

En general, los nanofertilizantes son una alternativa más eficaz para el suministro de nutrientes de los cultivos, la liberación controlada de nutrientes a la raíz, en lugar de fuera del área de la raíz a través de la lixiviación, promueve una restauración eficiente de los nutrientes en la planta, la lixiviación se minimiza en el ámbito de utilización de los nanofertilizantes; los nanofertilizantes eliminan las corrientes demandas y ventanas de aplicación de nutrientes, razón por la cual causan bajos impactos ambientales; para alimentar eficazmente las plantas,

recientes consultas anteriores establecieron que las nanopartículas permiten una entrega precisa de nutrientes porque los nutrientes se entregan a la cantidad correcta y en el momento apropiado en condiciones favorables, y las investigaciones anteriores revelaron que las nanopartículas aumentan la biodisponibilidad del micronutriente quelato de Fe, lo que lleva a un mayor rendimiento agrícola (Subramanian et al., 2015).

La hidroxiapatita (HA) es un fosfato de calcio, es el componente mineral del tejido óseo y dental en vertebrados, su estructura y composición química la hacen biocompatible y seguro para el uso en aplicaciones biomédicas (Pang et al., 2021). Las fuertes propiedades fisicoquímicas y su tamaño nanométrico la han convertido en un material atractivo en la investigación biomédica y otras disciplinas, y su interacción con células y biomoléculas se ve facilitada por su superficie específica agrandada (Liu et al., 2020). La producción global de girasol alcanza alrededor de 47 millones de toneladas, abarcando una superficie de 26,5 millones de hectáreas; el girasol es una materia prima relevante tanto para la industria del aceite como por su valor agregado, él girasol es altamente valorado a nivel mundial por sus múltiples aplicaciones, que incluyen el uso como aceite, alimento y forraje, y por su demanda entre una gran población, el aceite de girasol es incoloro, inodoro, y resistente a la oxidación tanto en almacenamiento como durante la cocción, gracias a su excelente calidad como aceite comestible, es el más elegido por la mayoría de la población, asimismo, cuando el rendimiento relativo de los genotipos de girasol cultivados en distintas ecologías ambientales es altamente significativo, las interacciones entre genotipo y ambiente representan un desafío importante y pueden ser beneficiosas para mejorar el girasol en regiones geográficas específicas (Gul & Coban, 2020). El objetivo de esta investigación es examinar el impacto de las nanopartículas (NP) de hidroxiapatita en el cultivo de girasol, particularmente en los antioxidantes que se encuentran en el aceite de girasol.

REVISION DE LITERATURA

Producción agrícola

La agricultura sigue siendo uno de los pilares de la economía de todo el mundo, garantizando la seguridad alimentaria de la población y la disponibilidad de materias primas, también juega un papel crucial en la estabilización de muchas comunidades rurales (FAO, 2021). Al mismo tiempo, este sector se ha enfrentado a desafíos nunca antes vistos, desde el cambio climático hasta la necesidad de satisfacer una creciente demanda de alimentos en un contexto de recursos limitados; en estos sentidos, tener prácticas agrícolas más sostenibles y más avanzadas desde un punto de vista tecnológico es la única opción, y en este contexto, la agricultura no solo es un proveedor de alimentos, sino un mecanismo para mitigar el impacto ambiental adverso (World Bank, 2020).

Evolución de la agricultura y tecnología

Así mismo, la agricultura se ha transformado en sistemas cada vez más tecnificados, que incluyen la agricultura de precisión, el uso de drones y sensores remotos, la inteligencia artificial, entre otras prácticas para maximizar la cantidad de cultivo obtenida con la misma cantidad de recursos empleados y con el menor daño al medio ambiente posible (Zhang *et al.*, 2021). Por otro lado, la digitalización de la agricultura ha permitido recolectar gran cantidad de datos que facilitan la toma de decisiones sobre la cantidad de agua y fertilizantes a utilizar, aumentando un promedio del 15% de eficiencia en los últimos cinco años (Jones *et al.*, 2022).

Por otra parte, la biotecnología y la ingeniería genética han sido claves para la creación de cultivos resistentes a sequías o a temperaturas más altas, lo que ha sido fundamental en regiones afectadas por un mayor cambio climático (Rosales *et al.*, 2021). A pesar de los beneficios mencionados, también plantea dilemas éticos y ambientales, ya que algunos de estos avances pueden provocar una dependencia del negocio y utopía de las mismas (FAO, 2021).

Impacto socioeconómico actual de la agricultura

En el mundo en desarrollo, la agricultura es la principal fuente de ingresos y ocupación para casi la mitad de la población ocupada, y responsable de impulsar la fabricación carente de energía (Khalid et al., 2022).

Por lo tanto, es una fuente importante de empleo y sustento para millones de personas en el mundo, sobre todo en los países en desarrollo; de acuerdo al sector agrícola (FAO, 2021), el cual produce de alrededor el 30% del empleo a nivel global, sigue siendo fundamental para la seguridad alimentaria en condiciones de pobreza; no obstante, la crisis climática y económica, la cual se ha exacerbado en el último decenio, ha dejado las a comunidades de este modo debilitándolas y ha puesto en peligro los sistemas de subsistencia en muchas sociedades y ha acentuado la desigualdad social en las zonas rurales (World Bank, 2020).

En el campo de protección del ambiente agrícola y de los recursos naturales, hay dos razones principales; en primer lugar, el daño y la contaminación ya ocasionada debe ser compensado y el nivel de contaminación ambiental del proceso de producción agrícola reducido; por supuesto, esto se logra en el nivel indicado por las leyes y regulaciones de protección del ambiente y reglamentarias adecuadas de cada país a este respecto, así como las regulaciones ecológicas de producción agrícola que deben elaboradas de acuerdo con las peculiaridades del recinto y las características económicas y de desarrollo de la región (Li, 2021).

La pandemia de COVID-19 también ha revelado las vulnerabilidades de la producción y las cadenas de suministro alimentarias globales; por lo tanto, es fundamental subrayar la necesidad de sistemas agrícolas resilientes, los cuales pueden adaptarse a todas las circunstancias cambiantes (FAO, 2021).

Agricultura y sostenibilidad ambiental

La agricultura moderna emite una cantidad significativa de gases de efecto invernadero, por lo que es uno de los principales generadores de cambio

climático (IPCC, 2022). Las medidas para disminuir sus efectos se han centrado en lo que se conoce como la práctica de la agricultura sostenible, que apunta a reducir el uso de recursos no renovables y alentar la diversidad biológica; estas medidas involucran métodos como la agroecología, la rotación de cultivos y los sistemas de cultivo agroforestal (López-García *et al.*, 2022).

De la misma manera, la importancia de transición hacia una agricultura climáticamente inteligente, ya que permite fomentar prácticas que ayuden a la mitigación de las emisiones de GHG, la adaptación de la producción agrícola ante el cambio climático y la seguridad alimentaria; no obstante, la implementación de estos acuerdos requiere un cambio radical de política pública, infraestructura y financiamiento (Jones *et al.*, 2022).

En el campo de protección del ambiente agrícola y de los recursos naturales, hay dos razones principales; en primer lugar, el daño y la contaminación ya ocasionada debe ser compensado y el nivel de contaminación ambiental del proceso de producción agrícola reducido; por supuesto, esto se logra en el nivel indicado por las leyes y regulaciones de protección del ambiente y reglamentarias adecuadas de cada país a este respecto, así como las regulaciones ecológicas de producción agrícola que deben elaboradas de acuerdo con las peculiaridades del recinto y las características económicas y de desarrollo de la región (Li, 2021).

Antecedentes históricos de la agricultura

Una de las áreas más importantes que ha permitido a la humanidad avanzar en su desarrollo hasta el momento ha sido la agricultura; gracias a las plantaciones y la cría de animales, la humanidad ha logrado avanzar de sociedades nómadas a comunidad sedentaria productora de alimentos; gracias a esto, la población pudo aumentar significativamente en número, y el desarrollo cultural se llevó a cabo activamente; todo esto comenzó hace unos 10,000 años, esparcido en diferentes regiones del mundo, lo que marcó el comienzo del cambio en la estructura de la sociedad humana (Mazoyer y Roudart, 2021).

Origen de la agricultura

Una de las transformaciones más significativas de la historia de la humanidad, conocida como la Revolución Neolítica, fue el paso a la agricultura; en este período, las personas comenzaron a domesticar plantas y animales, creando el primer “ajetreo” y técnicas de pastoreo; la agricultura apareció de forma independiente en diferentes áreas, incluidas el Creciente Fértil, el valle del Indo y Mesoamérica, donde se adaptó a las condiciones ambientales locales (Bellwood, 2019). Como resultado, surgieron sociedades en las que apareció una jerarquía social, así como la posibilidad de acumular excedente crises (Price y Bar-Yosef, 2018).

Evolución de la agricultura

Con la cultura de la agricultura, las civilizaciones precursoras crearon los sistemas de riego y las prácticas agrícolas mejoradas; en el antiguo Egipto y Mesopotamia, instituciones estatales crearon el sistema de canales de riego para usar el agua de manera más efectiva y producir cultivos en áreas desérticas (McNeill, 2019). Durante la Edad Media en Europa y Asia, nuevas prácticas agrícolas, como la rotación de la presa y la reja, mejoraban la productividad agrícola, estableciendo la fundación para la formación de ciudades y la economía agraria (Mazoyer y Roudart, 2021).

Revolución agrícola moderna

La agricultura moderna comenzó a desarrollarse en el siglo XVIII con la revolución agrícola en Europa; se caracterizó por mejorar las técnicas de cultivo, desarrollar maquinaria agrícola e implementar cultivos más productivos; estas últimas permitieron un mayor rendimiento de producción y una disminución en la dependencia de la mano de obra (Grigg, 2019). Durante el siglo XX, la llamada revolución verde aumentó la productividad en los países en desarrollo a través de la fertilización y pesticidas y de variedades de cultivo altamente productivas, como el trigo y el arroz (Evenson y Gollin, 2020).

A pesar de que la Revolución Verde logró aumentar la producción de alimentos a un nivel aún inalcanzable, también ha causado daños ambientales como la desertificación del suelo y la disminución de la biodiversidad; por lo tanto, el mundo comenzó a pensar en una agricultura sostenible (Pingali, 2021).

Actualmente, la agricultura enfrenta desafíos derivados del cambio climático y la presión sobre los recursos naturales; la agricultura contemporánea busca un equilibrio entre la productividad y la sostenibilidad, promoviendo prácticas que conservan el suelo y reducen el uso de insumos químicos; el surgimiento de la agroecología y la agricultura de precisión, que emplea tecnología para optimizar el uso de recursos, son ejemplos de cómo se intenta hacer frente a estos desafíos (Altieri y Nicholls, 2020).

Factores bióticos y abióticos

Un ecosistema es una entidad formada por una red de interacciones entre factores bióticos, que son todos los organismos vivos, y factores abióticos, que cubren las condiciones físicas y químicas del entorno; la vivacidad entre estos dos factores impacta en la identificación de todos los ecosistemas y ejerce influencia en su biodiversidad; además, influye en los procesos ecológicos más importantes, como el flujo de energía en el ecosistema y el flujo de nutrientes (Odum y Barrett, 2020).

Los factores abióticos son componentes no vivos que influyen directamente en la vida y la distribución de los organismos en un ecosistema; entre los principales factores abióticos se encuentran la luz solar, la temperatura, el agua, el suelo y los nutrientes (Smith y Smith, 2021).

La cantidad y la calidad de la luz son factores esenciales para que las plantas realicen la fotosíntesis, un proceso sin el cual los vegetales y otros organismos autótrofos no podrían producir su propio alimento y oxígeno; por supuesto, la cantidad y la calidad de la luz también condicionan el crecimiento y la distribución

espacial de las especies vegetales y, por ende, animal, que depende de ellas (Chapin et al., 2022).

La temperatura influye en las tasas metabólicas de los organismos, y su variación determina qué especies pueden sobrevivir en un ecosistema específico; por ejemplo, los organismos ectotermos, como los reptiles, dependen de la temperatura ambiental para regular su metabolismo, lo que limita su distribución a áreas con condiciones climáticas específicas (Molles, 2021).

El agua es un recurso clave para todos los organismos vivos, ya que es el lugar donde se llevan a cabo la mayoría de las reacciones bioquímicas; la “disponibilidad” de agua y humedad en el suelo determina la estructura y función de los ecosistemas, desde los desiertos hasta las selvas tropicales (Ricklefs y Relyea, 2020).

Los minerales del suelo y otros nutrientes son proporcionados por el suelo a las plantas, lo que luego mantiene a los consumidores primarios y, en última instancia, a toda la cadena trófica; la capacidad el pH y la capacidad de retención de agua son propiedades físicas y químicas que influyen en los diferentes ecosistemas terrestres (Smith y Smith, 2021).

Factores bióticos en el sistema

Los factores bióticos son organismos vivos, incluidos los productores, consumidores y descomponedores, presentes en un ecosistema; estos organismos están interrelacionados a través de redes tróficas y ciclos de nutrientes que sustentan la vida en el ecosistema (Odum y Barrett, 2020).

Los productores, como las plantas, las algas y algunas bacterias, son autótrofos que fabrican su propia comida a través de la fotosíntesis o la quimiosíntesis; los productores son la base de las cadenas tróficas y su presencia es vital para mantener la vida en cualquier ecosistema (Chapin *et al.*, 2022).

Interacción entre factores bióticos y abióticos

El primero se refiere a los factores bióticos y abióticos que están en interacción permanente; la luz y la disponibilidad de agua en un ecosistema, y el correspondiente oficio de la vegetación dominante condicionan simultáneamente la distribución y la abundancia de los herbívoros y sus depredadores de la siguiente manera; además, los cambios en los factores abióticos, como el cambio climático y la modificación de los suelos, pueden alterar la interacción biótica, lo que puede afectar a las especies en cuestión y el cambio de biodiversidad (Chapin *et al.*, 2022). Estas interacciones permiten la resiliencia de los ecosistemas a las perturbaciones ambientales; debido a los posibles efectos secundarios del cambio climático en las cosechas, varias estrategias se han implementado para atenuar los efectos adversos del cambio climático, incluidos genotipos resistentes, varios reguladores del crecimiento de la planta y fertilizantes orgánicos, la nanotecnología es actualmente otra técnica presente en el sector agrícola (Khalid *et al.*, 2022).

Es especialmente crucial encontrar métodos para reducir los efectos del estrés por amonio en el crecimiento de los cultivos; recientemente, los nanomateriales han sido reconocidos como la mejor alternativa para reemplazar las sustancias nitrogenadas utilizadas en el crecimiento de las plantas (Wu *et al.*, 2023).

Agroquímicos

Los agroquímicos, que incluyen compuestos fertilizantes, herbicidas, insecticidas y fungicidas, han sido fundamentales para la agricultura moderna, más aún, a partir de la Revolución Verde; estos productos químicos ayudan a aumentar la productividad de los cultivos y a combatir las plagas y enfermedades que destruyen la producción agrícola (Pretty y Bharucha, 2019). Aunque el uso excesivo y continuado de estos compuestos ha tenido consecuencias ambientales y en la salud de las personas (Tilman *et al.*, 2020).

Tanto fertilizantes sintéticos como orgánicos fertilizantes a las plantas con los nutrientes esenciales necesarios para el crecimiento y los rendimientos futuros

de la planta, tales como nitrógeno, fósforo y potasio; en comparación con hace un siglo, la producción agrícola mundial ha aumentado significativamente debido a la producción de fertilizantes sintéticos; sin embargo, el exceso de fertilizantes sintéticos ha causado la contaminación del agua y el suelo (Zhang *et al.*, 2021).

De forma general, los plaguicidas pueden categorizarse como insecticidas, herbicidas y fungicidas; los insecticidas son químicos que combaten a los insectos que atacan los cultivos; los herbicidas eliminan las plantas, no deseadas o maleza, por último, los fungicidas previenen enfermedades provocadas por hongos; a pesar de los grandes beneficios de los plaguicidas para la lucha contra las enfermedades y la mejora de la agricultura, el uso de plaguicidas también tiene efectos colaterales, como la resistencia de los organismos a los plaguicidas (Aktar *et al.*, 2020).

Contaminación del agua, suelo y pérdida de biodiversidad

En el agua también puede producirse la contaminación que resulta de los percoladores o productos químicos y nutrientes en exceso, ya que se escurren los campos; los fertilizantes y los plaguicidas pueden percolar de los campos de cultivo a ríos, lagos y acuíferos con un efecto devastador en la vida acuática; los nutrientes en exceso, como los nitratos y los fosfatos, aumentan la eutrofización, que es un incremento en la floración de algas, que compite con los otros organismos acuáticos por el oxígeno (Carvalho *et al.*, 2019).

La aplicación constante de abonos y pesticidas influye en la composición del suelo y en la disminución de su fertilidad a largo plazo; la acumulación de ciertas sustancias tóxicas descompone la microfauna y la estructura del suelo, reducen la viabilidad de nutrientes y agua, lo cual tiene un impacto directo sobre la producción agrícola (Chen *et al.*, 2021).

Los agroquímicos también pueden dañar especies no objetivo, como polinizadores, como las abejas y otros insectos beneficiosos; en diferentes espacios de trabajo, la exposición al pesticida ha sido reconocida como una

amenaza para las poblaciones de polinizadores, así como para otros organismos críticos para el ecosistema, lo que podría poner en peligro la cosecha de cultivos dependientes de la polinización (Goulson *et al.*, 2020).

Impacto en la salud humana

Los agroquímicos no solo contaminan, sino que también afectan la salud humana, la exposición por inhalación, contacto directo o consumo de alimentos con residuos asociados con problemas de salud, como enfermedades respiratorias, cáncer y alteraciones hormonales (Mostafalou y Abdollahi, 2017).

Los agroquímicos son una preocupación importante debido a la exposición a niveles muy altos entre los trabajadores agrícolas, ya que la exposición puede considerarse más significativa en términos de riesgo para la población; por otro lado, los residuos de Pesticida en alimentos son una preocupación para los consumidores, principalmente cuando el cuerpo acumula sustancias con el tiempo (Mancini *et al.*, 2019).

Producción de alimentos

La producción de alimentos es de suma importancia para el bienestar humano y para la seguridad alimentaria de las poblaciones, con el aumento de la población mundial, las demandas de alimentos también crecen, presentando un desafío significativo a los sistemas de producción y los recursos naturales disponibles (Godfray *et al.*, 2019). Para cumplir con las cantidades requeridas de alimentos, los sistemas de producción intensivos han sido desarrollados; sin embargo, tanto su viabilidad ambiental como sus modelos de distribución y acceso han sido cuestionados (Foley *et al.*, 2020).

Métodos de producción de alimentos

La agricultura convencional, por su parte, emplea agroquímicos, maquinaria y tecnología moderna para abastecer de alimentos al mundo occidental; este modelo, si bien ha logrado incrementar la oferta de alimentos en todo el mundo,

ha causado problemas como la deforestación, la degradación del suelo y la contaminación del agua, entre otros (Tilman *et al.*, 2021). Si bien la producción energética es muy alta, la demanda y el consumo de energía y recursos no renovables son insostenible a largo plazo (Pretty y Bharucha, 2020).

La agricultura orgánica, por otro lado, busca disminuir el empleo de insumos químicos y se enfoca en prácticas sostenibles, como la fotodinámica entre cultivos, el compostaje y el control biológico de infestaciones, por un lado, esenciales para la subsistencia y beneficio de la fauna y flora silvestres, con la posibilidad de producir alimento de mejores condiciones y libre de restos químicos (Reganold y Wachter, 2016). Sin embargo, uno de los mayores desafíos de la agricultura orgánica es que, en promedio, rinde menos que el tipo de agricultura convencional, por consiguiente, podría no poder suplementar a una población que va en aumento (Seufert *et al.*, 2020).

La agricultura de conservación es un enfoque que combina técnicas mínimas de labranza, cobertura permanente del suelo y rotación de cultivos, cuya finalidad es mejorar la salud del suelo y la disminución de la erosión; además de mejorar la fertilidad del suelo, esta técnica también conduce a una disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero y el uso de agua, lo que la convierte en una opción sustentable para abordar el cambio climático (Lal, 2020). De esta manera, dicho enfoque promueve la resiliencia de los sistemas agrícolas y sustentabilidad de la producción de alimentos (FAO, 2021).

Desafíos en la producción de alimentos

El cambio climático se sitúa entre los principales desafíos a los que se enfrenta la producción de alimentos debido a sus efectos directos sobre la disponibilidad de los recursos naturales críticos, como el agua y el suelo, el aumento de la temperatura, la intensificación de los eventos de precipitación y la aparición de eventos climáticos extremos ejercen un impacto negativo tanto en el rendimiento de los cultivos como en la viabilidad del ganado; según las proyecciones, a menos que se implanten estrategias de adaptación, el cambio climático tendrá un

impacto negativo significativo en la producción de alimentos en múltiples regiones del mundo (Nelson *et al.*, 2019).

Asimismo, la degradación del suelo por la intensificación de la agricultura y el uso excesivo de fertilizantes y pesticidas socava la futura producción de alimentos, unas tres cuartas partes de los recursos hídricos, el 70 por ciento del consumo de agua dulce del mundo, se utilizan para la irrigación, ejerciendo una gran presión sobre el agua en todo el mundo (Foley *et al.*, 2020). Estos datos indican que la degradación de recursos críticos subraya la necesidad de prácticas de manejo sostenible para la producción de alimentos (FAO, 2021).

A pesar del crecimiento en la producción, la distribución sigue siendo desigual y desigual, dejando a muchas personas con problemas de acceso, casi 820 millones de personas en el mundo padecen inseguridad alimentaria, mientras que una gran cantidad de alimentos se desperdicia a medida que avanza por la cadena (HLPE, 2020). La falta de igualdad en la disponibilidad de alimentos para diferentes regiones es un reto logístico y ético que requiere una reestructuración de la cadena de suministro a nivel global para reducir el desperdicio y mejorar la distribución (Godfray *et al.*, 2019).

Alternativas en la producción de alimentos

Por otro lado, la agricultura de precisión es una técnica que utiliza tecnologías avanzadas como sensores y sistemas de monitoreo para maximizar el uso de los recursos y la eficiencia de todo el proceso de producción de alimentos en agricultura hay una aplicación precisa de agua, fertilizantes, y pesticidas, y, por lo tanto, un desperdicio reducido de los recursos mencionados; este enfoque también ayuda a ahorrar en la producción de alimentos y a reducir las emisiones de huella de carbono (Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer, 2020).

Los sistemas de producción en ambientes controlados también se destacan por promover la producción de alimentos y productos agrícolas en espacios limitados. Invernaderos y sistemas de producción en trabajadoras verticales se distinguen

por cultivar alimentos en condiciones climáticas óptimas y espacios reducidos: la agricultura vertical y otros modelos alimentarios similares pueden ser útiles en áreas urbanas y zonas donde el suelo y el agua son limitados, además, la tecnología hidropónica y aeropónica utilizada en la agricultura vertical afirma producir la misma cantidad de alimentos en menos tierra debido a los sistemas de cultivo integrados, lo que requiere menos agua para la producción (Despommier, 2019).

Gracias a la biotecnología, se han desarrollado cultivos de OGM resistentes a las plagas, las enfermedades y las malas condiciones climáticas; pueden aumentar la productividad de las granjas cuando el suelo y el clima no son perfectos y resolver el problema de los químicos y pesticidas que dañan la naturaleza y el agua, sin embargo, el uso de OGM y árboles genéticos seleccionados es un tema muy polémico ya que todavía no está comprobado al 100% cómo puede influir en la salud humana y natural (Qaim, 2020).

Tecnología agrícola

La tecnología agrícola ha avanzado considerablemente en las últimas décadas. La razón principal detrás de su desarrollo es la creciente demanda de alimentos y la necesidad de reducir el impacto ambiental de la agricultura. Dado que las innovaciones incorporadas en la agricultura pueden hacer que el uso de los recursos sea más eficiente y mejor puede aumentar la productividad y disminuir la dependencia de sustancias químicas, también significa que la tecnología agrícola es más sostenible (Basso & Antle, 2020).

La Inteligencia Artificial (IA) son una pieza fundamental para eficientar la sustentabilidad y productividad en un ámbito ambiental, las innovaciones tecnológicas son la base para que el público y los científicos desarrollen tecnologías capaces de mejorar los procesos de producción y disminuir los estragos al ecosistema (Puttha et al., 2023).

Desafíos en la implementación de la tecnología agrícola

La inversión es otro desafío en la adopción de tecnologías agrícolas, ya que muchas tecnologías requieren una inversión tremenda, como la inteligencia artificial, los drones y los sistemas de sensores, y la inversión todavía requiere capacitación especializada (Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019). Esto constantemente excluye a los pequeños agricultores de la competencia. Además, el uso de sensores e IoT genera muchos datos, lo que puede resultar en preocupaciones sobre su seguridad y privacidad; la recolección y el almacenamiento de información de producción deben seguir las normas y reglamentos de seguridad y proteger a los agricultores de los datos (Wolfert *et al.*, 2017).

Fruto de esto, se han logrado realizar investigaciones relacionadas con la generación de productos de calidad y más saludables y la búsqueda de una alternativa; en estos estudios, se evidencia ya que no ha sido posible vislumbrar el deterioro de la estructura física, química y biológica del suelo; en comparación con otros abonos, en este estudio se utilizó abonos biológicos, elaborados en su totalidad con ningún producto químico y que no cause daño al suelo y el ambiente, existen algunos abonos que son naturales muy utilizados, entre los más conocidos se encuentra el vermicompostaje, aunque vulgarmente es conocido como lombricultura es la materia procedente de la transformación de los residuos orgánicos a través de lombrices y se convierten en abonos orgánicos (Gul & Coban, 2020).

Nanotecnología

La nanotecnología se ocupa del estudio de las estructuras de la materia a nivel de una milmillonésima de metro; una nanopartícula es un pequeño conjunto de moléculas que está rodeado por una capa interfacial, típicamente con una dimensión que va de 1-100 nanómetros (Khalid *et al.*, 2022). De igual modo tiene la capacidad de manipular la materia al nivel subatómico y molecular a través de

la nanotecnología ha brindado oportunidades nuevas para la innovación de materiales, la medicina, la electrónica y medio ambiente (Bhushan, 2017).

Antecedentes de la nanotecnología

El concepto de nanotecnología fue introducido en 1959 por el físico Richard Feynman durante su famoso discurso "*There's Plenty of Room at the Bottom*", en ese, Feynman sugirió la posibilidad de manipular átomos y moléculas individuales para formar estructuras a nanoescala, mostrando sus posibles aplicaciones y el efecto que tendría en el mundo, por supuesto, en aquel entonces, dichas ideas parecían imposibles, pero el discurso de Feynman en realidad fue el primer paso conceptual hacia el desarrollo de la nanotecnología (Feynman, 1960).

Hasta la década de 1980, la nanotecnología no pasaba de ser algo exclusivamente experimental; el desarrollo de la tecnología fue facilitado por la aparición de herramientas como el microscopio de efecto túnel desarrollado por Binnig y Rohrer en 1981 y el microscopio de fuerza atómica propiedad de Binnig, Quate y Gerber en 1986; con su ayuda, por primera vez, pudieron observar y manipular átomos y moléculas individuales, lo que redujo significativamente los problemas con la nanoescala y sentó las bases para la experimentación en nanotecnología (Binnig & Rohrer, 1982).

La nanotecnología es otro sector que puede impactar significativamente en áreas como la medicina, la electrónica y la industria de materiales; de acuerdo con una publicación de la Comisión Europea, el mercado mundial de los productos de nanotecnología alcanzó 1.5 billones de dólares para el año 2020, y el desarrollo de aplicaciones adicionales contribuirá a la expansión en el futuro (European Commission, 2020).

Aplicaciones en la agricultura

La nanotecnología se ha propuesto como una herramienta revolucionaria en múltiples industrias, y la agricultura no es la excepción, al permitir la manipulación

de materiales a escala nanométrica, dicha tecnología ofrecería nuevas oportunidades para hacer más eficientes las prácticas agrícolas a través de la nutrición y protección de cultivos, mejoras en la calidad del suelo y la seguridad alimentaria, entre otros; como resultado, si se implanta con éxito, la nanotecnología en la agricultura abordará múltiples desafíos globales, incluidos el aumento de la demanda de alimentos, el cambio climático y la necesidad de disminuir el uso de agroquímicos convencionales (Khot *et al.*, 2012).

En general, los nanofertilizantes constituyen una alternativa más eficaz para el suministro de nutrientes a los cultivos, la liberación controlada de nutrientes a la raíz, en lugar de fuera del área de la raíz a través de la lixiviación, promueve una restauración eficiente de los nutrientes en la planta, la lixiviación se minimiza en el ámbito de utilización de los nanofertilizantes; los nanofertilizantes eliminan las continuas demandas y ventanas de aplicación de los nutrientes, razón por la cual causan bajos impactos ambientales; para alimentar eficazmente las plantas, recientes consultas anteriores establecieron que las nanopartículas permiten una entrega precisa de nutrientes, ya que los nutrientes se entregan en la cantidad correcta y en el momento apropiado en condiciones favorables, las investigaciones anteriores revelaron que las nanopartículas aumentan la biodisponibilidad del micronutriente quelato de Fe, lo que lleva a un mayor rendimiento agrícola (Subramanian *et al.*, 2015).

Nanobiotecnología vegetal

La nanobiotecnología vegetal es una subdisciplina emergente que ha fusionado los conceptos de nanotecnología y biotecnología con el objetivo de mejorar diversos aspectos de la agricultura; este, en cambio, ayuda a mejorar la absorción de nutrientes, a la resistencia de plantas a plagas y enfermedades y, asimismo, a la adaptación de plantas al estrés que resulta del cambio climático y la polución, gracias a los enfoques orientados a las conclusiones, especialmente abarcan nanobiomateriales y sistemas de entrega biocompatibles, los expertos pueden referir la influencia de las ideologías gubernamentales mediante el enfoque de la

nanobiotecnología para la lucha contra el cáncer (Mahapatra *et al.*, 2021). La necesidad de moda sostenible en la agricultura generalmente ha llevado a más su uso en el campo, gracias a que se ha convertido en la agricultura más ecológica y eficiente (Shang *et al.*, 2023).

En plantas, uno de los enfoques más importantes de la nanobiotecnología es la formulación de nanofertilizantes, las nanopartículas biodegradables están diseñadas para liberar nutrientes en forma controlada y facilitar su absorción por las raíces, de modo que los nutrientes liberados sean absorbidos antes de la lixiviación o la volatilización en el aire; los nanofertilizantes de nitrógeno encapsulado permiten a los nutrientes esenciales liberarse ya que las plantas pueden usar de una forma más fácil y reducen la necesidad de nuevas aplicaciones al facilitar la eficacia de absorción, además, con esta tecnología se reduce la cantidad de fertilizantes aplicados, lo que reduce su impacto en el medio ambiente (Souri *et al.* (2021).

Nanopartículas de hidroxiapatita

La hidroxiapatita (HA) es un fosfato de calcio con la fórmula química $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ y es el componente mineral del tejido óseo y dental en vertebrados, su estructura y composición química la hacen biocompatible y seguro para el uso en aplicaciones biomédicas (Pang *et al.*, 2021). Las fuertes propiedades fisicoquímicas y su tamaño nanométrico la han convertido en un material atractivo en la investigación biomédica y otras disciplinas, y su interacción con células y biomoléculas se ve facilitada por su superficie específica agrandada (Liu *et al.*, 2020).

Propiedades fisicoquímicas de las nanopartículas de hidroxiapatita

La nano-HA tiene propiedades únicas diferentes de HA a modelos más grandes, la nanoescala de HA impulsa la solubilidad y la adhesión al tejido, esencial para su uso en regeneración ósea y dental (Reyes-Gasga *et al.*, 2022). Además, la nano-HA tiene una alta relación de área superficial a volumen, lo que mejora la

unión con las células y aumenta la eficacia de los medicamentos inyectable polvo seco⁴⁹⁷ que se utiliza como sistema de entrega (Li *et al.*, 2020).

Además, esas propiedades pueden modificarse variando el tamaño, la forma y la funcionalización de la superficie de las partículas, por lo tanto, las nano-HA pueden adaptarse fácilmente a diferentes aplicaciones clínicas y de ingeniería de materiales (Li *et al.*, 2020).

Síntesis de nanopartículas de hidroxiapatita

Hay varios métodos para sintetizar nano-HA que incluyen precipitación química, sol-gel, hidrólisis, etc. y cada uno de ellos determina el tamaño, la morfología y las propiedades de las NANOp partículas producidas; la precipitación química es una técnica común utilizada para obtener nano-HA de la más alta pureza, mientras que el método sol-gel le permite lograr un estricto control sobre el tamaño y la morfología, que son críticos para una aplicación en particular (Zhang *et al.*, 2021).

Recientemente, se ha investigado la síntesis verde de nano-HA mediante extractos vegetales, una estrategia sostenible y amigable con el ambiente que reduce el uso de sustancias químicas tóxicas en el proceso de síntesis (Wu *et al.*, 2020).

Aplicación de las nanopartículas de hidroxiapatita

Las aplicaciones biomédicas de las nano-HA son variadas, desde la regeneración de Hueso-hueso y dental-hasta la administración de drogas, en ortopedia y odontología, las nano-HA han sido muy utilizados en el implante y el relleno de materiales de desecado, ya que promueve la oseointegración y mejora la bioactividad (Kumar *et al.*, 2022).

Por otro lado, las nano-HA también funcionan como sistemas de liberación controlada de medicamentos debido a su biocompatibilidad y la capacidad de transportar agentes terapéuticos en su superficie, esto también facilita el

desarrollo de sistemas de entrega que son dirigidos y controlados, lo que es sencillo en aplicaciones que involucran condiciones óseas y enfermedades crónicas (Park *et al.*, 2021).

Desafíos y perspectivas futuras

Por otro lado, la producción y uso de nano-HA presenta desafíos, que comprenden la estabilidad de las nanopartículas en medios biológicos y la necesidad de obtener una distribución uniforme de tamaño, los riesgos adicionales del uso de nano-HA, por ejemplo, en el contexto del potencial toxicológico, también están identificados; dado que el nano-HA no se ha investigado exhaustivamente, no se sabe si existe algún riesgo de exposición si se utiliza en moléculas (Chen *et al.*, 2021).

La investigación futura se centra en optimizar la funcionalización de las nano-HA para mejorar su especificidad y reducir su toxicidad, además de explorar nuevas aplicaciones en medicina regenerativa y terapias avanzadas (Zhao *et al.*, 2022).

El método de síntesis de nanopartículas hace un amplio uso de fuentes naturales como bacterias, hongos y plantas, además de extractos de plantas que facilitan técnicas de producción amigables con el medio ambiente; estas fuentes naturales, además de ser ecológicas, actúan como agentes reductores y estabilizadores para controlar la forma y el tamaño de las nanopartículas, es necesario buscar fuentes naturales más seguras y sostenibles con el fin de investigar la síntesis de hidroxiapatita NHA, los métodos más comunes de síntesis de NPs son los mediadores de extractos de plantas que difieren de los productos químicos tradicionales utilizados, que previenen la aglomeración; estos extractos vegetales son conocidos por contener fitoquímicos con propiedades antiinflamatorias y antioxidantes, el sistema de síntesis ecológica aprovechando los extractos de plantas que existen en cantidades relativamente grandes es sencillo y seguro para el manejo, no tóxico y efectivo a diferentes condiciones de temperatura, pH y concentraciones de sal; a pesar de esto, no se ha publicado información sobre combinación del proceso de obtención de hidroxiapatita a partir

de residuos biológicos y la síntesis utilizando platillas ecológicas (Irwansyah, Noviyanti, Eddy, & Risdiana, 2022).

Por lo tanto, la síntesis de nanomateriales está ganando cada vez más interés; es importante que los nanomateriales basados en hidroxiapatita utilizados como implantes posean propiedades antibacterianas; para mejorar aún más la propiedad antibacteriana de la hidroxiapatita, el objetivo del presente estudio es la incorporación de calcio en la estructura utilizando diferentes métodos y comparar la efectividad de estos métodos (Petkes, Farkas, Marincas, Bartha-Vari, & Barabás, 2023).

Girasol (*helianthus annuus*)

El girasol, nombre científico *Helianthus annuus*, es una planta de gran importancia económica y ecológica utilizada principalmente para la producción de aceite, alimentación para animales y producción de productos industriales, el girasol es nativo de América del Norte, pero se ha domesticado y cultivada en todo el mundo porque es capaz de crecer en diversas condiciones agroclimáticas (Mann *et al.*, 2021).

El girasol es originario de América del Norte, y en particular, crece en áreas que hoy representan México y ciertos estados del sur de los Estados Unidos, se piensa que la domesticación del girasol comenzó alrededor de hace 5,000 años, cuando las comunidades indígenas lo empezaron a cultivar por sus semillas y aceite nutritivos (Kahraman *et al.*, 2023). La evidencia arqueológica recopilada a lo largo de los años indica que el girasol fue una de las primeras plantas cultivadas en toda América del norte, y se utilizó para alimentos y ceremonias culturales (Davis *et al.*, 2022).

La producción global de girasol alcanza alrededor de 47 millones de toneladas, abarcando una superficie de 26,5 millones de hectáreas; el girasol es una materia prima relevante tanto para la industria del aceite como por su valor agregado, él

girasol es altamente valorado a nivel mundial por sus múltiples aplicaciones, que incluyen el uso como aceite, alimento y forraje, y por su demanda entre una gran población, el aceite de girasol es incoloro, inodoro, y resistente a la oxidación tanto en almacenamiento como durante la cocción, gracias a su excelente calidad como aceite comestible, es el más elegido por la mayoría de la población, asimismo, cuando el rendimiento relativo de los genotipos de girasol cultivados en distintas ecologías ambientales es altamente significativo, las interacciones entre genotipo y ambiente representan un desafío importante y pueden ser beneficiosas para mejorar el girasol en regiones geográficas específicas (Gul & Coban, 2020).

Los usos como alimento

El historial evolutivo de la nutrición humana no careció de cambios significativos, al mismo tiempo, según muchos estudios, se debe prestar especial atención al hecho de que los alimentos que las personas consumen son una de las causas de muchas enfermedades, por lo tanto, en los tiempos modernos, y especialmente en los países desarrollados, una población preocupada por sí misma a menudo presta especial atención a la nutrición a fin de llevar un estilo de vida saludable, tanto los carbohidratos como las proteínas y las grasas son componentes importantes de una dieta balanceada; al abastecerse de estos últimos, es aconsejable que una persona consuma tanto de origen animal como de origen vegetal, los especialistas han establecido recomendaciones nutricionales para combatir la desnutrición; no obstante, muchos países trabajan para prevenir enfermedades crónicas como las cardiovasculares, la obesidad y la diabetes, y están revisando estas pautas dietéticas (Zeynep Aksoylu Özbek, 2020).

El aceite de girasol es uno de los aceites vegetales más populares que tiene un gran valor nutricional o de propiedades industriales, la variedad de aceite de girasol refinado se consume a gran escala en la población porque se almacena mejor que los obtenidos en frío, lo que supone un desafío adicional para los

mejoradores de girasoles interesados en crear híbridos con alto índice de oxidación; el aceite de girasol estándar es rico en ácido linoleico, con un contenido que varía entre el 48 y el 74%. Contiene bajos niveles de ácidos grasos saturados, principalmente palmítico y esteárico; a diferencia de otros aceites como el de soja y el de colza, el aceite de girasol tiene cantidades insignificantes de ácido linolénico, los aceites con un alto contenido de ácidos grasos poliinsaturados, especialmente ácido linolénico, se oxidan rápidamente, además de los triglicéridos, los aceites obtenidos mediante prensado en frío contienen también compuestos que acompañan a los lípidos (Luzaic, Grahovac, Hladni, & Romanic, 2022).

Entre los aceites vegetales, el aceite de girasol es uno de los más abundantes, debido a las propiedades nutricionales, e industriales; a su vez, el aceite de girasol refinado es el más popular en la dieta de la población, porque, con la vida útil de este tipo de aceite difiere del aceite de prensado en frío, lo que complica aún más la tarea de los mejoradores, que intentan obtener híbridos con características antioxidantes mejoradas (Tanja Z. LUŽAIĆ1, 2022).

Importancia del cultivo

El girasol se ha convertido en uno de los oleaginosos más demandados y extendidos en todo el mundo, y su popularidad sigue creciendo, el aceite fue uno de los productos clave, conforme a los datos de la FAO en 2022, el aceite de girasol representó alrededor de 10% de la producción mundial de aceite vegetal (FAO, 2022). Mientras tanto, la demanda de aceite de girasol sigue creciendo, el hambre de la industria alimentaria y la creciente tendencia alimentaria por los aceites naturales obligan a los agricultores a plantar más girasol, y eso no es todo; el girasol se cultiva activamente para su uso en la industria alimentaria, se utiliza en la producción de productos industriales e incluso de biocombustibles (Gupta *et al.*, 2023).

Las semillas de girasol son altamente nutritivas y contienen una variedad de compuestos beneficiosos para la salud, tienen un alto contenido de ácidos grasos

insaturados, vitamina E, fibra y antioxidantes, convirtiendo los granos de girasol en alimentos funcionales que pueden ayudar a prevenir enfermedades crónicas como enfermedades cardíacas o algunos tipos de cáncer (Khaled *et al.*, 2021). El aceite de girasol también tiene un perfil de lípidos favorable y es popular en la cocina y la industria alimentaria, ya que sabe suave y tiene un alto punto de humeo (Zhang *et al.*, 2023).

Fertilizantes

Aunque el uso de insumos químicos y sintéticos a lo largo del tiempo ha aumentado la producción por unidad de superficie debido al desarrollo de las áreas agrícolas, también ha resultado en una considerable contaminación del suelo, los alrededores, los cultivos y los recursos de agua subterránea, como resultado, se produjo una aceleración de la investigación para la creación de productos de mayor calidad y saludables mientras se mantiene la estructura física, química y biológica del suelo; en este sentido, se usaron fertilizantes biológicos, elaborados exclusivamente a partir de materias primas naturales, sin influir negativamente en el medio ambiente (Gül, Coban, & Öztürk, 2021).

Fertilizante orgánico

Uno de los fertilizantes naturales más sobresaliente es el vermicompostaje o lombricultura, la cual se entiende como “El material resultante parcial del procesamiento de residuos orgánicos por lombrices, consistente en abonos orgánicos”, de manera más específica también se le puede describir como: el fertilizante orgánico, de mayor importancia, en la mayoría de los países, rico, utilizado en la forma sólida y líquida, producido mediante la digestión de los diferentes residuos vegetales y animales por lombrices californianas, que contiene diferentes hongos y microorganismos de dos tipos simbiótico y asimbióticos (Gül *et al.*, 2021).

Biofertilizante

Los biofertilizantes son productos que contienen microorganismos vivos, que, una vez aplicados al suelo o la superficie de la planta, mejoran la disponibilidad de nutrientes, promueven el crecimiento vegetal y aumentan la productividad de los cultivos, dadas las tendencias actuales hacia la agricultura sostenible y ecológica, los biofertilizantes se vuelven cada vez más relevantes para la agricultura moderna (Ravindran *et al.*, 2022).

El interés en las prácticas agrícolas sostenibles es un impulsor del crecimiento de la investigación y el desarrollo de biofertilizantes, el aumento de las condiciones de producción y la educación de los agricultores llevarán a una creciente adopción de biofertilizantes y, por lo tanto, a sistemas agrícolas más sostenibles y mayor seguridad alimentaria mundial (Mishra *et al.*, 2023).

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del experimento

El presente estudio se realizó durante la temporada de verano del año 2022 en el campo experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro-Unidad Laguna (UAAAN-UL), ubicado en la carretera Periférico y Santa Fe, Km 1.5, Torreón, Coahuila, México. Las coordenadas geográficas son 103° 25' 75" de longitud Oeste al meridiano de Greenwich y 25° 31' 11" de latitud Norte, con una altitud de 1123 msnm.

Preparación del terreno

La preparación del terreno consistió en barbecho, rastra, nivelación y marcaje de surcos. Se instaló un sistema de riego de cinta calibre 6000 con emisores a 30 cm.

Siembra

Se realizó en seco y de forma manual, en un sistema de siembra en surcos sencillos, depositando dos semillas por golpe a una distancia de 30 cm.

Establecimiento del experimento

Se utilizaron semillas de girasol adquiridas del banco de germoplasma de la UAAAN. Se realizaron cuatro tratamientos de suelo diferentes: vermicomposta (VC) con características establecidas (Cuadro 1), fertilizante químico (MAP 11-52-00 y Urea), biofertilizante (Biotlakualli ®) y un testigo. En cada una de estas áreas se sembró semilla de girasol. Estos tratamientos fueron sometidos a dosis variables de nanopartículas de hidroxiapatita $[(Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2]$ (2000, 4000 y 6000 ppm) utilizadas como fertilizante durante el riego.

Componentes	VC
Nitrógeno (N)	32.1 (mg•kg ⁻¹)
Nitratos (NO ₃ -1)	128.33 (mg•kg ⁻¹)
Amonio (NH ₄ ⁺)	149.3 (mg•kg ⁻¹)
Fósforo (P)	54.67 (mg•kg ⁻¹)
Potasio (K)	461.0 (mg•kg ⁻¹)
Calcio (Ca)	39.85 (mg•kg ⁻¹)
Sulfato (SO ₄ -2)	
Magnesio (Mg)	1.60 (mg•kg ⁻¹)
Manganeso (Mn)	4.36 (mg•kg ⁻¹)
Cobre (Cu)	0.92 (mg•kg ⁻¹)
Hierro (Fe)	1.28 (mg•kg ⁻¹)
Zinc (Zn)	1.37 (mg•kg ⁻¹)
Propiedades adicionales	
Aspecto físico	Marrón oscuro sólido
Material orgánico (%)	8.5
pH	8.2
Conductividad eléctrica (dS•m ⁻¹)	6.18
Capacidad de intercambio catiónico (cmol•L ⁻¹)	

Cuadro 1. Composición nutricional del vermicompost (VC)

Cosecha

La cosecha se realizó de forma manual a los 120 días de la siembra, cosechándose todas las plantas de cada tratamiento. Posteriormente se realizaron mediciones agronómicas (altura, diámetro del tallo y diámetro del disco floral) de cuatro plantas de cada tratamiento tomadas al azar. Posteriormente se recuperó la semilla de las cuatro diferentes flores cosechadas del cultivo de cada tratamiento para la extracción de aceite que fue analizado.

Extracción de aceite

Las semillas fueron separadas de la cáscara y procesadas mediante prensado en seco en un extractor de marca. Luego el aceite extraído fue depositado en frascos de color ámbar para evitar su oxidación y almacenado a temperatura ambiente hasta su análisis.

Medición de variables

Variables agronómicas

Se cuantificó en base a cuatro plantas al azar como la distancia desde la base de la planta hasta el nudo donde inicia el capítulo floral para la altura, se midió el diámetro del tallo en cada planta al igual que el diámetro del disco floral del cultivo. Todas las medidas fueron en centímetros.

Determinación de compuestos fenólicos totales

El contenido de compuestos fenólicos totales (CFT) se evaluó utilizando una modificación del método de Folin-Ciocalteu, como lo describen Ramirez-Aragon et al. (2024). Las distintas muestras de aceite se mezclaron con hexano antes del análisis. Primero, se combinaron 50 μL de cada muestra preparada con 3 mL de agua destilada en un tubo de ensayo. Posteriormente, se agregaron 250 μL del reactivo de Folin-Ciocalteu (Sigma-Aldrich, St. Louis MO, EE. UU.) a la mezcla. Después de agitar en vórtex durante 10 segundos, la mezcla se dejó reposar durante tres minutos para facilitar la reacción. Luego de esto, se agregaron 750 μL de solución de carbonato de sodio (20% p/v) a cada tubo de muestra y se agitó en vórtex durante 10 segundos, seguido de la adición de 950 μL de agua destilada para agitar en vórtex adicionalmente. Las muestras se dejaron incubar durante 2 horas a temperatura ambiente en un ambiente oscuro. Después de la incubación, las muestras se transfirieron a un espectrofotómetro UV (Genesys, EE. UU.) y se midieron a una absorbancia de 765 nm. Todos los análisis se realizaron por triplicado. Los compuestos fenólicos totales se cuantificaron utilizando una curva de calibración con ácido gálico como estándar, y los resultados se expresan en miligramos de equivalentes de ácido gálico por gramo de muestra (mg GAE mL⁻¹).

Cuantificación de flavonoides totales

Se empleó el método descrito por Baba y Malik (2015) para evaluar el contenido total de flavonoides (FVT). Inicialmente, se colocaron 50 μ L del extracto obtenido de la muestra en un tubo de ensayo, seguido de la adición de etanol para lograr un volumen final de 1 mL. Posteriormente, las muestras se mezclaron con 4 mL de agua destilada y 0,3 mL de solución de NaNO₃ al 5%, seguido de la adición de 0,3 mL de solución de AlCl₃ al 10%. La mezcla resultante se incubó durante 5 minutos. Después de este período de incubación, se añadieron 2 mL de solución de NaOH a 1 M y el volumen se ajustó a 10 mL con agua bidestilada. La mezcla se dejó reaccionar durante 15 minutos. La cuantificación de flavonoides se realizó mediante espectrofotometría a una absorbancia de 510 nm. El contenido total de flavonoides se expresó en miligramos de quercetina equivalente por gramo de muestra (mg QE mL⁻¹). Los análisis se realizaron por triplicado.

Actividad antioxidante total

La evaluación de la capacidad antioxidante se realizó siguiendo una modificación de la técnica propuesta por Domínguez y Ordoñez (2013), utilizando ABTS (ácido 2,2'-azinobis[3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico]-sal diamónica) como fuente de radicales (Sigma-Aldrich®, EE. UU.). En los ensayos, 10 μ L de la muestra preparada se mezclaron con 990 μ L de la solución radical ABTS ajustada. Después de un período de incubación de 30 minutos, se midió la absorbancia a 734 nm mediante espectrofotometría. La curva de calibración se estableció utilizando Trolox (ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcroman-2-carboxílico) como agente antioxidante estándar. Los resultados se expresaron como micromoles de equivalente de Trolox por mililitro de muestra (μ M TE mL⁻¹).

Análisis estadístico

Se empleó un diseño completamente aleatorizado, con tres réplicas. Las variables evaluadas incluyeron altura de planta, diámetro del tallo, diámetro de la cabeza, compuestos fenólicos totales, contenido de flavonoides y capacidad antioxidante. Los datos fueron analizados estadísticamente utilizando ANOVA para comparar medias. Se utilizó la prueba LSD para verificar diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95% ($p < 0,05$). Los datos fueron analizados utilizando el software Statistica 6.0®.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las nanopartículas son materiales que se caracterizan por tener tamaños que van desde 1 a 100 nanómetros. Estas partículas presentan propiedades distintivas atribuibles a sus características físicas y químicas a escala nanométrica, que difieren de las del material en masa (Dakal et al., 2016).

Según Wu y Li (2022), la interacción de las nanopartículas con las plantas en el campo se realiza principalmente a través de la aplicación foliar o radicular.

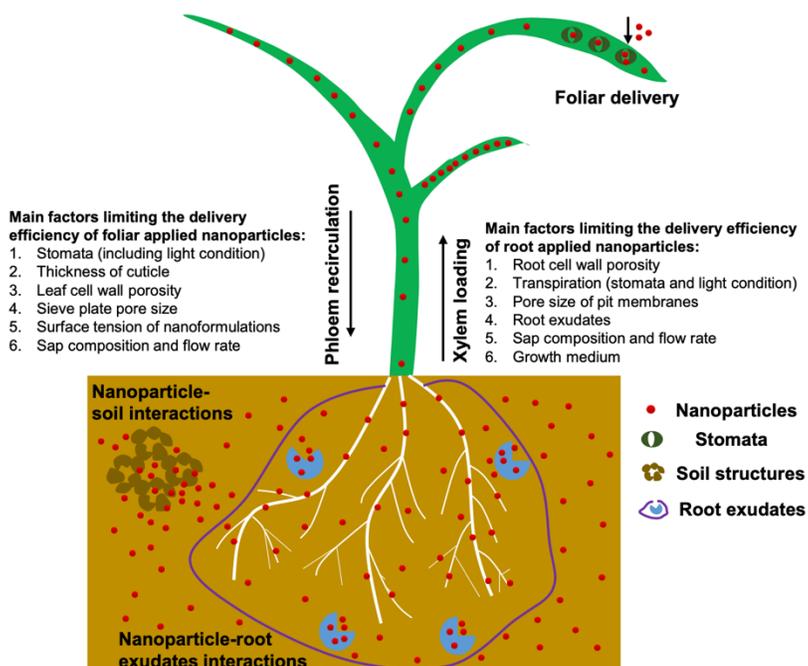


Figura 1. Factores principales que restringen la eficiencia de la entrega de nanopartículas a las plantas.

En el presente estudio se observaron diferencias significativas ($p < 0,05$) tanto entre los tratamientos de suelo como entre las distintas dosis de nanopartículas de hidroxiapatita adicionadas al cultivo de girasol. Los resultados indicaron que para la variable altura de planta, el mejor tratamiento fue el vermicompost, seguido del fertilizante químico, el biofertilizante y el testigo, con valores que oscilaron entre 299,6, 289,4, 271,8 y 258,6 cm, respectivamente.

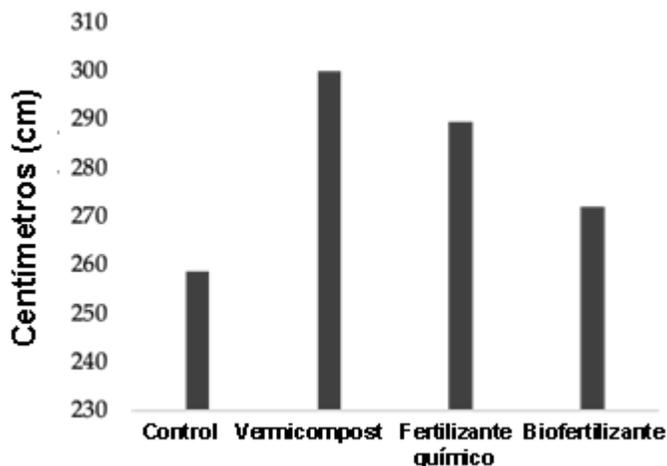


Figura 2. Altura en plantas del cultivo de girasol en diferentes tratamientos en suelo

En cuanto a los resultados obtenidos para la variable altura, comparando las dosis de nanopartículas de hidroxiapatita adicionadas a los diferentes tratamientos de suelo, se obtuvieron rangos entre 2,68 – 2,87 m. La dosis que arrojó mayor altura fue la de 4000 ppm de nanopartículas, seguida de la de 6000 ppm, siendo la dosis de 2000 ppm la que reportó el resultado más bajo para esta variable.

| Dosis de NPs de hidroxiapatita
Altura |
|--|--|--|--|
| 2000 ppm | 2.68 ± 0.10 | 3.34 ± 0.27 | 21.37 ± 1.36 |
| 4000 ppm | 2.87 ± 0.07 | 3.80 ± 0.22 | 23.53 ± 1.53 |
| 6000 ppm | 2.84 ± 0.11 | 3.83 ± 0.31 | 23.93 ± 0.91 |

Cuadro 2. Resultados del efecto sobre variables agronómicas de las dosis de nanopartículas de hidroxiapatita aplicadas.

Para las variables agronómicas relativas al diámetro del tallo y del diámetro de la cabeza de las diferentes plantas de girasol tratadas con distintas dosis de nanopartículas de hidroxiapatita, los resultados oscilaron entre 3,83 - 3,34 cm para el diámetro del tallo y 23,9 - 21,3 cm para el diámetro de la cabeza. Se encontró que la concentración más alta de hidroxiapatita (6000 ppm) produjo los mejores resultados para las tres variables agronómicas medidas.

Por otra parte, las variables medidas entre diámetro de tallo y diámetro de cabeza mostraron resultados donde no existe diferencia significativa para el diámetro de tallo, pero sí para los diámetros de cabeza de las flores del cultivo de girasol. Los resultados con valores más altos son los presentados cuando el suelo fue tratado con vermicompost, y el valor más bajo para el tratamiento con biofertilizante.

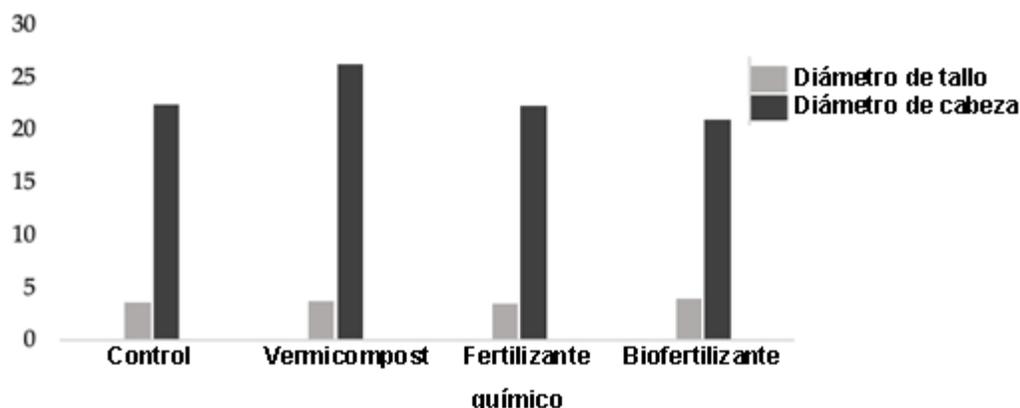


Figura 3. Diámetro del tallo y diámetro de la cabeza en el cultivo de girasol por diferentes tratamientos utilizados en el suelo.

Los estudios han demostrado que los fertilizantes que contienen nanopartículas de hidroxiapatita (HANP) pueden ofrecer una mejor entrega de nutrientes de fósforo en contextos agrícolas, lo que conduce a un mayor rendimiento de los cultivos y la producción de biomasa vegetal. Las propiedades físicas y químicas mejoradas de las nanopartículas (NP) tienen un potencial significativo para mitigar las consecuencias ambientales, como la pérdida de nutrientes, asociada con los fertilizantes convencionales (Madanayake et al., 2021). A una concentración de 1000 mg L⁻¹ de HANP, Bala et al. (2014) y Liu et al. (2015) observaron una mejor germinación de las semillas y el crecimiento de las plantas en garbanzos (*Cicer arietinum* L.), así como un mayor porcentaje de germinación en semillas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Estos resultados se refieren a los resultados positivos de las nanopartículas de hidroxiapatita en varias variables de la planta, que se alinean con los hallazgos informados en este experimento.

En cuanto a las propiedades fitoquímicas obtenidas en este experimento, se obtuvieron resultados para las variables de compuestos fenólicos totales (CPT), flavonoides totales (TF) y capacidad antioxidante (AOX). Se realizaron análisis para

cada variable para los diferentes tratamientos establecidos en el suelo donde se estableció el cultivo de girasol, así como los efectos generados por las diferentes dosis de hidroxiapatita utilizadas en el riego. De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, se puede observar que para las variables CPT y TF, la dosis de 4000 ppm de HANPs mostró los mejores resultados en los diferentes aceites de girasol, no así para la variable AOX, donde los resultados mostraron que el efecto de la dosis de concentración más alta de nanopartículas (6000 ppm) tuvo la mejor respuesta en el aceite de girasol.

Dosis de nanopartículas de hidroxiapatita	TPC mg GAE mL ⁻¹	FT mg QE mL ⁻¹	AOX μM TE mL ⁻¹
2000 ppm	18.16 ± 2.3	35.86 ± 4.39	22945.23 ± 570.74
4000 ppm	30.57 ± 2.15	67.31 ± 4.38	20344.04 ± 832.86
6000 ppm	18.75 ± 3.23	38.09 ± 5.41	23329.16 ± 429.61

Cuadro 3. Efecto de las nanopartículas de hidroxiapatita sobre variables fitoquímicas

Los resultados reportados en esta investigación para los diferentes tratamientos de suelo arrojaron datos que oscilaron entre 17.9 a 35.4 mg GAE mL⁻¹ para TPC y 29.8 a 60.7 mg QE mL⁻¹ para FT, donde los datos de menor concentración correspondieron al tratamiento con fertilizante químico y los valores más altos se reportaron en el tratamiento con biofertilizante.

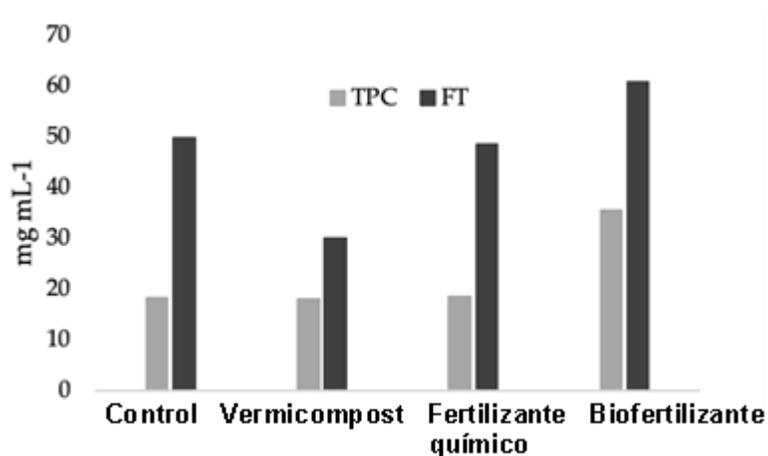


Figura 4. TPC y FT en aceite de girasol para diferentes tratamientos en suelo

Respecto a la actividad antioxidante obtenida, se reportaron datos que oscilaron entre 18024,60 y 25159,52 $\mu\text{M TE mL}^{-1}$, resultados que fueron para el tratamiento control y vermicompost respectivamente.

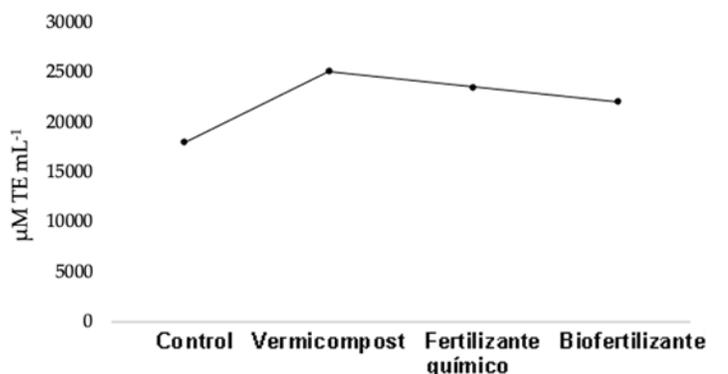


Figura 5. AOX en aceite de girasol para diferentes tratamientos en suelo

Las nanopartículas son prometedoras como un nuevo elicitador abiótico para estimular la producción de compuestos bioactivos en cultivos de células y tejidos vegetales (Hatami et al., 2019). En los últimos años, numerosos estudios han explorado el uso de nanopartículas como elicitores para inducir la expresión de genes responsables de la biosíntesis de metabolitos secundarios (Hu et al., 2020). Aunque se necesita más investigación para comprender completamente el mecanismo, algunos autores sugieren que las nanopartículas desencadenan la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) y moléculas de señalización secundaria, lo que resulta en una regulación transcripcional en el metabolismo secundario de las plantas (Rivero-Montejo et al., 2021).

Diversos metabolitos secundarios aumentan en las plantas cuando están bajo el efecto de las nanopartículas. Los polifenoles han despertado un interés significativo tanto por parte de los científicos como de los consumidores últimamente, debido a sus posibles atributos medicinales en la prevención y el tratamiento de diversas enfermedades degenerativas, en particular cánceres, dolencias cardiovasculares y trastornos neurodegenerativos (Tsao, 2010). Aparte de sus reconocidas funciones biológicas como antioxidantes y propiedades anticancerígenas, las nanopartículas de plata (Ag NPs) también exhiben actividades antimicrobianas y antifúngicas, estas últimas prometedoras en la agricultura. Las Ag NPs han sido reconocidas como un

elicitor novedoso y eficiente en la biotecnología vegetal para mejorar la producción de compuestos bioactivos (Rezaei et al., 2011).

En un estudio realizado por Sabry et al. (2023), se obtuvieron resultados cuando sus tratamientos se desarrollaron con nanopartículas de hidroxiapatita. Evaluaron componentes presentes en el aceite esencial de plantas de perejil, que mostraron diferencias entre las diversas dosis utilizadas para los tratamientos en esa investigación. Obtuvieron valores con mayor actividad de compuestos bioactivos cuando la dosis de nanopartículas fue de 0,5 g L⁻¹. Estos investigadores coinciden con los resultados reportados en este experimento. Los resultados reportados en los diferentes tratamientos bajo dosis de nanopartículas de hidroxiapatita indican que existe un efecto en la concentración de metabolitos secundarios.

CONCLUSIONES

Los tratamientos de suelo utilizados en la implementación del experimento exhibieron diferencias entre los resultados reportados en las variables fitoquímicas. Entre estos tratamientos, el vermicompost mostró mayor efectividad en la mayoría de las variables medidas. Con respecto a las dosis de nanopartículas de hidroxiapatita adicionadas al riego de girasol, también se observaron diferencias en las variables evaluadas. La dosis de 4000 ppm presentó los valores más significativos para la mayoría de las variables. Las variables agronómicas no mostraron diferencias significativas para las dosis de hidroxiapatita. Los resultados del presente estudio respaldan el uso de nanopartículas de hidroxiapatita en el cultivo de girasol, logrando el objetivo planteado al inicio de la investigación donde las NPs tienen efecto sobre los antioxidantes encontrados en el aceite de girasol.

REFERENCIAS

- Aktar, W., Sengupta, D., & Chowdhury, A. (2020). Impact of pesticides use in agriculture: Their benefits and hazards. *Interdisciplinary Toxicology*, 2(1), 1–12.
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2020). Agroecology and the search for a truly sustainable agriculture. *Sustainability*, 12(5), 210.
- Avsar, C., & Gezerman, A. O. (2023). An Evaluation of Phosphogypsum (PG)-Derived Nanohydroxyapatite (HAP) Synthesis Methods and Waste Management as a Phosphorus Source in the Agricultural Industry. *Materials Science-Medziagotyra*, 29(2), 247-254. doi:10.5755/j02.ms.31695.
- Basso, B., & Antle, J. (2020). Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. *Nature Sustainability*, 3(4), 254-256.
- Bellwood, P. (2019). *First Farmers: The Origins of Agricultural Societies*. Wiley-Blackwell.
- Bongiovanni, R., & Lowenberg-DeBoer, J. (2020). Precision agriculture and sustainability. *Precision Agriculture*, 12(5), 581-600.
- Bhushan, B. (2017). *Introduction to Nanotechnology*. Springer.
- Carvalho, F. P. (2019). Agriculture, pesticides, food security and food safety. *Environmental Science & Policy*, 9(1), 685-692.
- Chapin, F. S., Matson, P. A., & Vitousek, P. (2022). *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer.
- Chen, W., Luo, H., & Liu, Q. (2021). Functionalized hydroxyapatite nanoparticles and their biomedical applications. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 200, 111577.
- Chen, Z., Luo, X., & Qiao, J. (2021). Impact of chemical fertilizers and pesticides on soil health and ecosystem: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 217, 112297.
- Dakal, T.C.; Kumar, A.; Majumdar, R.S.; Yadav, V. (2016) Mechanistic basis of antimicrobial actions of silver nanoparticles. *Front. Microb.* 7, 1831.
- Davis, M. G., Hart, M. A., & Smith, J. R. (2022). Archaeobotanical evidence for the domestication of sunflower in North America. *American Journal of Botany*, 109(1), 1-12.
- Despommier, D. (2019). *The vertical farm: Feeding the world in the 21st century*. Picador.
- European Commission. (2020). *Nanotechnology: Economic and societal challenges*. EU Publications.
- Evenson, R. E., & Gollin, D. (2020). Assessing the impact of the Green Revolution, 1960 to 2000. *Science*, 300(5620), 758-762.
- FAO. (2021). *The State of Food and Agriculture 2021: Making agrifood systems more resilient to shocks and stresses*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO (2022). *Oilseeds: World Markets and Trade*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Feynman, R. P. (1960). There's Plenty of Room at the Bottom. *Engineering and Science*, 23(5), 22-36.

- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., ... & Zaks, D. P. (2020). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369), 337-342.
- Kahraman, M., Karpuzoglu, B., & Ozdemir, C. (2023). The genetic diversity and domestication history of sunflower. *Plant Genetic Resources*, 21(1), 45-56.
- Khot, L. R., Sankaran, S., Maja, J. M., Ehsani, R., & Schuster, E. W. (2012). Applications of nanomaterials in agricultural production and crop protection: A review. *Crop Protection*, 35, 64-70.
- Grigg, D. B. (2019). The agricultural revolution in the history of human society. *Geography*, 4(1), 1-15.
- Godfray, H. C. J., Aveyard, P., Garnett, T., Hall, J. W., Key, T. J., Lorimer, J., ... & Jebb, S. A. (2019). Meat consumption, health, and the environment. *Science*, 361(6399), eaam5324.
- Goulson, D., Nicholls, E., Botías, C., & Rotheray, E. L. (2020). Bee declines driven by combined stress from parasites, pesticides, and lack of flowers. *Science*, 347(6229), 1255957.
- Gul, V., & Coban, F. (2020). DETERMINATION OF YIELD AND QUALITY PARAMETERS OF OIL SUNFLOWER GENOTYPES GROWN IN TURKEY. *Turkish Journal of Field Crops*, 25(1), 9-17. doi:10.17557/tjfc.609749
- Gül, V., Coban, F., & Öztürk, E. (2021). Effect of Liquid and Solid Vermicompost Applications on Growth and Yield of Sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Alinteri Journal of Agriculture Sciences*, 36(1), 55-60. doi:10.47059/alinteri/V36I1/AJAS21009
- Gupta, A., Saini, R., & Kumar, S. (2023). Economic viability of sunflower oil production: A case study from India. *Journal of Oilseed Brassica*, 14(1), 34-47.
- Hatami, M.; Naghdi Badi, H.; Ghorbanpour, M. Nano-elicitation of secondary pharmaceutical metabolites in plant cells: A review. *J. Med. Plants* 2019, 18, 6–36.
- HLPE. (2020). *Food security and nutrition: Building a global narrative towards 2030*. High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security, Rome.
- Hu, P.; An, J.; Faulkner, M.M.; Wu, H.; Li, Z.; Tian, X.; Giraldo, J.P. Nanoparticle Charge and Size Control Foliar Delivery Efficiency to Plant Cells and Organelles. *ACS Nano* 2020, 14, 7970–7986.
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Irwansyah, F. S., Noviyanti, A. R., Eddy, D. R., & Risdiana, R. (2022). Green Template-Mediated Synthesis of Biowaste Nano-Hydroxyapatite: A Systematic Literature Review. *Molecules*, 27(17), 14. doi:10.3390/molecules27175586
- Khaled, A., El-Metwally, I. M., & Al-Ali, K. (2021). Nutritional benefits of sunflower seeds and their applications in food products. *Journal of Food Science and Technology*, 58(3), 849-858.
- Khalid, M. F., Khan, R. I., Jawaid, M. Z., Shafqat, W., Hussain, S., Ahmed, T., ... Marc, R. A. (2022). Nanoparticles: The Plant Saviour under Abiotic Stresses. *Nanomaterials*, 12(21), 25. doi:10.3390/nano12213915

- Kumar, A., Srivastava, A., & Pandey, R. (2022). Hydroxyapatite nanoparticles for biomedical applications: Recent trends and future perspectives. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 110(1), 5-16.
- Lal, R. (2020). Soil health and climate change: An overview. *Geoderma*, 364, 114396.
- Li, D. (2021). Application of artificial intelligence and machine learning based on big data analysis in sustainable agriculture. *ACTA AGRICULTURAE SCANDINAVICA*, 71(9), 956-969.
- López-García, F., Herrera, P., & Duarte, E. (2022). Agroecology and Sustainable Food Systems in the Face of Climate Change. *Environmental Research Letters*, 17(5), 5401.
- Lowenberg-DeBoer, J., & Erickson, B. (2019). Precision agriculture technology adoption in the USA: Strategic insights. *Agricultural Systems*, 173, 72-83.
- Liu, J., Zhao, Z., & Yan, J. (2020). Hydroxyapatite nanoparticles as drug carriers for cancer treatment. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 31(2), 161-175.
- Luzaic, T. Z., Grahovac, N. L., Hladni, N. T., & Romanic, R. S. (2022). Evaluation of oxidative stability of new cold-pressed sunflower oils during accelerated thermal stability tests. *Food Science and Technology*, 42, 8. doi:10.1590/fst.67320.
- Madanayake, N. H., Adassooriya, N. M., & Salim, N. (2021). The effect of hydroxyapatite nanoparticles on *Raphanus sativus* with respect to seedling growth and two plant metabolites. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 15, 100404.
- Mahapatra, A., Kumar, R., & Biswas, D. (2021). Nanotechnology applications in agriculture for sustainable food systems. *Sustainable Agriculture Reviews*, 54, 1-20.
- Mancini, F., Van Bruggen, A. H. C., Jiggins, J. L. S., Ambatipudi, A. C., & Murphy, H. (2019). Acute pesticide poisoning among female and male cotton growers in India. *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 11(3), 221–232.
- Mann, H. C., Bolivar, J. E., & Prochaska, D. (2021). Sunflower production and its impact on rural economies: A case study from North America. *Agricultural Economics*, 52(3), 321-334.
- Mazoyer, M., & Roudart, L. (2021). *A History of World Agriculture: From the Neolithic Age to the Current Crisis*. Monthly Review Press.
- McNeill, W. H. (2019). *The Rise of the West: A History of the Human Community*. University of Chicago Press.
- Mishra, P., Gupta, S., & Roy, S. (2023). Innovations in biofertilizers: New horizons for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1016569.
- Nelson, G. C., Valin, H., Sands, R. D., Havlík, P., Ahammad, H., Deryng, D., ... & Willenbockel, D. (2019). Climate change effects on agriculture: Economic responses to biophysical shocks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3274-3279.

- Pang, X., Huang, Y., Zhang, Y., & Zhang, Q. (2021). Advances in hydroxyapatite nanoparticles for biomedical applications. *Ceramics International*, 47(1), 456-467.
- Pretty, J., & Bharucha, Z. P. (2020). Sustainable intensification in agricultural systems. *Annals of Botany*, 114(8), 1571–1596.
- Ravindran, K., Manivannan, A., & Saravanan, A. (2022). Biofertilizers for sustainable agriculture: Benefits and challenges. *Ecological Indicators*, 138, 108779.
- Reganold, J. P., & Wachter, J. M. (2016). Organic agriculture in the twenty-first century. *Nature Plants*, 2(2), 15221.
- Molles, M. C. (2021). *Ecology: Concepts and Applications*. McGraw-Hill Education.
- Mostafalou, S., & Abdollahi, M. (2017). Pesticides and human chronic diseases: Evidences, mechanisms, and perspectives. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 268(2), 157–177.
- Odum, E. P., & Barrett, G. W. (2020). *Fundamentos de ecología*. Cengage Learning.
- Seufert, V., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2020). Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature*, 485(7397), 229-232.
- Shang, L., Liu, P., & Zheng, Y. (2023). Nanobiotechnology and sustainable agriculture: Progress and perspectives. *Agricultural Nanotechnology*, 13, 70-85.
- Smith, T. M., & Smith, R. L. (2021). *Elements of Ecology*. Pearson Education.
- Subramanian, K. S., Tarafdar, J. C., & Raliya, R. (2015). *Nanofertilizers, nanourea and applications in plants: Concepts and perspectives*. Springer.
- Souri, M., Farahmand, A., & Pirzadah, T. B. (2021). Nanotechnology in agriculture: Nanofertilizers for sustainable crop production. *Journal of Plant Nutrition*, 43(5), 91-108.
- Park, J., Lee, J., & Lee, K. (2021). Hydroxyapatite nanoparticle-based drug delivery for osteosarcoma treatment. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 7(5), 2112-2123.
- Petkes, R., Farkas, N. I., Marincas, L., Bartha-Vari, J. H., & Barabás, R. (2023). SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF SILVER-DOPED HYDROXYAPATITE. *Studia Universitatis Babeş-Bolyai Chimia*, 68(4), 27-40. doi:10.24193/subbchem.2023.4.03.
- Pretty, J., & Bharucha, Z. P. (2019). Sustainable intensification in agricultural systems. *Annals of Botany*, 114(8), 1571–1596.
- Pingali, P. L. (2021). Green Revolution: Impacts, limits, and the path ahead. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(31), 12302-12308.
- Price, T. D., & Bar-Yosef, O. (2018). The origins of agriculture: New data, new ideas. *Current Anthropology*, 59(S17), S1-S16.
- Puttha, R., Venkatachalam, K., Hanpakdeesakul, S., Wongsu, J., Parametthanuwat, T., Srean, P., . . . Charoenphun, N. (2023). Exploring the Potential of Sunflowers: Agronomy, Applications, and Opportunities within Bio-Circular-Green Economy. *Horticulturae*, 9(10), 22. doi:10.3390/horticulturae9101079.

- Qaim, M. (2020). Role of new plant breeding technologies for food security and sustainable agricultural development. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 42(2), 129-150.
- Reyes-Gasga, J., Maruyama, T., & Rivera-Muñoz, E. M. (2022). Nanohydroxyapatite: Advances in synthesis, characteristics and applications in bone tissue engineering. *Acta Biomaterialia*, 133, 1-15.
- Ricklefs, R. E., & Relyea, R. A. (2020). *Ecology: The Economy of Nature*. Macmillan Learning.
- Rivero-Montejo, S. D. J., Vargas-Hernandez, M., & Torres-Pacheco, I. (2021). Nanoparticles as novel elicitors to improve bioactive compounds in plants. *Agriculture*, 11(2), 134.
- Rezaei, A.; Ghanati, F.; Behmanesh, M.; Mokhtari-Dizaji, M. Ultrasound-potentiated salicylic acid–induced physiological effects and production of taxol in hazelnut (*Corylus avellana* L.) cell culture. *Ultrasound Med. Biol.* 2011, 37, 1938–1947.
- Rosales, R., Sánchez, M., & González, T. (2021). Genetically Modified Crops and Climate Change Resilience. *Plant Biotechnology Journal*, 19(1), 5-12.
- Sabry, R., Elsayed, A., El-Ziat, R., Taha, Z., Farag, H., & AbouAitah, K. (2023). Hydroxyapatite nanoparticles as effective phosphorus nano-fertilizer on Italian parsley plants. *Scientific Journal of Agricultural Sciences*, 5(1), 20-36.
- Tanja Z. LUŽAIĆ¹, N. L. G., Nada T. HLADNI², Ranko S. ROMANIĆ^{1*} (2022). Evaluation of oxidative stability of new cold-pressed sunflower oils during accelerated thermal stability tests. *Food Sci. Technol, Campinas*, 42, 1-8. doi:<https://doi.org/10.1590/fst.67320>.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2021). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(50), 20260-20264.
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2020). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671–677.
- Tsao, R. Chemistry and biochemistry of dietary polyphenols. *Nutrients* 2010, 2, 1231–1246.
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big Data in smart farming—A review. *Agricultural Systems*, 153, 69-80.
- World Bank. (2020). *Future of Food: Harnessing Digital Technologies to Improve Food System Outcomes*. World Bank Publications.
- Wu, T. H., Zou, G. H., Lan, X. C., Zhang, G. X., Shan, Y., Liu, B. B., . . . He, Z. L. (2023). The Efficiency of Nanoparticles on Improving Seed Germination and Mitigating Ammonium Stress of Water Spinach
- Wu, H., Cheng, Y., & Tao, J. (2020). Green synthesis of hydroxyapatite nanoparticles for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: C*, 115, 111046. (<i>Ipomoea aquatica</i> Forssk.) and Hami Melon (<i>Cucumis melo</i> L.). *Sustainability*, 15(13), 14. doi:10.3390/su151310083.

- Zeynep Aksoylu Özbek, K. Ç. a. P. G. E. (2020). Consumers Knowledge About Health Effects of Edible Oils and Fats in Turkey: A Questionnaire Study. *Crimson Publishers*, 4(4), 1-9. doi:10.31031/NTNF.2020.04.000596.
- Zhang, W., Jiang, F., & Ou, J. (2021). Global pesticide consumption and pollution: With China as a focus. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(3), 1000–1011.
- Zhang, W., Zhu, X., & Wang, D. (2021). Advances in green synthesis of hydroxyapatite nanoparticles for biomedical applications. *Green Chemistry*, 23(4), 1456-1472.
- Zhang, X., Sun, Z., & Shi, Z. (2021). The role of artificial intelligence in sustainable agriculture: A review. *Agricultural Systems*, 191, 103159.
- Zhang, X., Wang, Y., & Chen, J. (2023). Health benefits of sunflower oil: A comprehensive review. *Nutrition Reviews*, 81(3), 225-237.
- Zhao, F., Yang, Y., & Xu, H. (2022). Hydroxyapatite nanoparticles: Applications in biomedical field and future trends. *Biomaterials Science*, 10(3), 784-799.