

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



USO DE NANOPARTICULAS DE HIDROXIAPATITA EN LA GERMINACIÓN Y
CRECIMIENTO EN EL CULTIVO DE GIRASOL

Tesis

Que presenta MONSERRAT PÉREZ ESQUIVEL
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



USO DE NANOPARTICULAS DE HIDROXIAPATITA EN LA GERMINACIÓN Y
CRECIMIENTO EN EL CULTIVO DE GIRASOL

Tesis

Que presenta MONSERRAT PÉREZ ESQUIVEL

como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA

Dr. Eduardo Arón Flores Hernández
Director UAAAAN

Dra. Victoria Jared Borroel García
Director externo

Torreón, Coahuila

Diciembre 2024

USO DE NANOPARTICULAS DE HIDROXIAPATITA EN LA GERMINACIÓN Y
CRECIMIENTO EN EL CULTIVO DE GIRASOL

Tesis

Elaborada por MONSERRAT PÉREZ ESQUIVEL 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 Aarón Flores Hernández
Asesor principal



Dra. Victoria Jared Borroel García
Asesor



Dr. José Luis Reyes Carrillo
Asesor



Dra. Dalia Ivette Carrillo Moreno
Jefe del Departamento de Postgrado



Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de Postgrado

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor principal, Le expresó mi más sincero y profundo agradecimiento a mi asesor principal, el Dr. Eduardo Aarón Flores Hernández, su inestimable guía y apoyo a lo largo de este proceso han sido fundamentales para la realización de esta tesis. Su vasto conocimiento, infinita paciencia y constante dedicación han sido una fuente de inspiración para mí, gracias infinitas por la oportunidad de haber trabajado con usted.

A mi asesora, la Dra. Victoria Jared Borroel García de corazón le agradezco sus valiosas sugerencias y sus consejos siempre acertados, así como su disposición para ayudarme a superar cada desafío que encontré en el camino. Sin su constante orientación y ánimo, este trabajo no hubiera sido posible.

A mi asesor, el Dr. José Luis Reyes Carrillo expreso mi más sincero agradecimiento por toda su ayuda en la estructura de mi tesis. Su orientación y conocimientos han sido esenciales para dar forma y coherencia a mi trabajo. Estoy profundamente agradecido por su paciencia, su dedicación y por estar siempre dispuesto a guiarme. ¡Gracias por todo su apoyo constante y por creer en mi proyecto!

A la compañera de Posgrado, la MVZ Guadalupe Salas Flores le agradezco a mi querida amiga y compañera, de posgrado por enseñarme a usar el programa EndNote. Tu ayuda ha sido verdaderamente invaluable, aprecio enormemente tu paciencia y generosidad al compartir tus conocimientos conmigo. No solo me has facilitado el trabajo, sino que también has demostrado lo que significa ser un verdadero compañero. ¡Gracias de todo corazón por tu apoyo y por estar siempre dispuesta a ayudarme!

A QFB Nancy Saraí Ogaz Camacho, por su ayuda y disposición de materiales necesarios para hacer posible esta investigación

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) por el apoyo económico otorgado para la realización de mis estudios de Maestría

DEDICATORIAS

A mis hijos, Darío, Neftalí y Mateo, por ser comprensivos, entender y apoyarme en esta etapa, por ser el motor de mi vida, ustedes me inspiran cada día a ser una mejor mamá, una mejor persona y una mejor amiga para ustedes, los amo infinitamente, gracias por ser unos niños fuertes y capaces de salir adelante cuando su mamá está buscando darles un mejor futuro.

A mi esposo, Darío Calvillo Montoya, por estar conmigo, por ayudarme a salir adelante y brindarme la confianza para crecer profesionalmente, sin ti, esto no sería posible. Gracias por formar una hermosa familia conmigo te amo con el alma.

A mis padres, María del Carmen Esquivel Castro y Patricio Pérez Luján por darme la vida, por su acompañamiento en este proceso, por forjar a una mujer fuerte y capaz de salir adelante a pesar de las adversidades, gracias infinitas por apoyarme en el cuidado de mis hijos cuando yo estuve estudiando, no tengo como pagarles tanto.

A mis hermanos, Patricio Pérez Esquivel, Rogelio Pérez Esquivel y Rodrigo Pérez Esquivel, su acompañamiento en este proceso fue algo fundamental, gracias por su ayuda y ser un ejemplo para mí.

A mis compañeros, Guadalupe Flores Salas y Oscar Emmanuel Gómez García gracias por ser el “Team Agronomía”, de lo bueno poco, y ustedes, son lo mejor que me pudo haber pasado en esta bonita etapa de mi vida.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
LISTA DE CUADROS	iv
LISTA DE FIGURAS	v
RESUMEN	vii
ABSTRACT	vii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Nanotecnología	3
2.1.1 Actualidad	3
2.1.2 Aplicaciones en medicina	4
2.1.3 Aplicaciones en la agricultura	5
2.2 Hidroxiapatita	7
2.2.1 Antecedentes	7
2.2.2 Aplicaciones	7
2.3 Nanoparticulas de hidroxiapatita	8
2.3.1 Usos y aplicaciones	8
2.3.2 Nanoparticulas de hidroxiapatita aplicadas en la agricultura	9
2.3.2.1 Nanofertilizantes	9
2.3.2.2 Nanoplaguicidas	10
2.4 Cultivo de girasol	10
2.4.1 Usos	12
2.4.2 Importancia	13
2.4.3 Semillas de Girasol	15
2.5 Germinación	16
2.5.1 Imbibición	19
III. MATERIALES Y MÉTODOS	21
3.1 Área de estudio	21
3.2 Clima	22
3.3. Selección de las semillas	23
3.4 Establecimiento del experimento	24
IV.RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
V.CONCLUSIONES	42
VI.REFERENCIAS	43

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1 Resultados de la etapa de imbibición de las semillas de girasol.	34
Cuadro 2 Total de semillas germinadas.	35
Cuadro 3 Medición a los 14 días de la plúmula.	36
Cuadro 4 Longitud de plúmula a los 28 días.	39
Cuadro 5 Longitud de plúmula a los 35 días.	39
Cuadro 6 Variables agronómicas del cultivo de girasol a los 100 días.	39
Cuadro 7 Componentes de nutrientes de las muestras de Girasol % MS.	41
Cuadro 8 Análisis de humedad y MS	41
Cuadro 9 Resultados de pH.	41
Cuadro 10 Composición química de las muestras de girasol de los diferentes tratamientos.	42

LISTA DE FIGURAS

	Pág.	
Figura 1	Partes de la planta de girasol	11
Figura 2	Productos y subproductos obtenidos del cultivo <i>Helianthus annuus</i>	14
Figura 3	Morfología de la semilla de girasol	16
Figura 4	Fases características del proceso de germinación de las semillas	18
Figura 5	Imagen explicativa de la absorción de agua por parte de las semillas	19
Figura 6	Etapas descriptivas de las ROS	20
Figura 7	Imagen cartográfica del municipio de Torreón, Coahuila	21
Figura 8	Instalaciones de la UAAAN	22
Figura 9	Mapa del Estado de Coahuila representando el tipo de clima	23
Figura 10	Semillas de girasol seleccionadas para el experimento	24
Figura 11	Cajas Petri (100x15 mm) previamente limpias.	24
Figura 12	Disposición de semilla en caja Petri.	25
Figura 13	Cajas Petri previamente etiquetadas con las diferentes dosis de nHAp.	26
Figura 14	Cámara de crecimiento para plantas [LAB- LINE INSTRUMENTS, INC, MODEL N° 464RH].	26
Figura 15	Cajas Petri en la cámara de crecimiento para el proceso de imbibición.	27
Figura 16	Semillas de girasol después de la imbibición	28
Figura 17	Papel Anchor humedecido.	29
Figura 18	Cestas de plástico con los rollos formados de papel anchor.	29
Figura 19	Semillas germinadas en el experimento de las diferentes dosis de tratamiento.	30
Figura 20	Invernadero medidas utilizado para el trasplante en suelo.	32

Figura 21	Planta en invernadero	32
Figura 22	Elaboración de silo de Girasol	33
Figura 23	Selección de la muestra del silo de Girasol	33
Figura 24	Total de semillas germinadas	36
Figura 25	Vigor de las semillas evaluadas.	37
Figura 26	Plántula de girasol tratamiento 0 ppm con una longitud de 60 mm a los 14 días.	38
Figura 27	Plántula de girasol tratamiento 2000 ppm con una longitud de 80 mm a los 14 días.	38
Figura 28	Plántula de girasol tratamiento 4000 ppm con una longitud de 90 mm a los 14 días	39
Figura 29	Plántula de girasol tratamiento 6000 ppm con una longitud de 60 mm a los 14 días	39
Figura 30	Curva de digestión de la muestra 2000 ppm	44
Figura 31	Curva de digestión de la muestra 4000 ppm	44
Figura 32	Curva de digestión de la muestra 6000 ppm	45

RESUMEN

Uso de nanopartículas de hidroxiapatita en la germinación y crecimiento
en el cultivo de girasol

Monserrat Pérez Esquivel

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

Dr. Eduardo Arón Flores Hernández

La agricultura es una actividad fundamental en todo el mundo, sin embargo, enfrenta desafíos significativos, tales como la pérdida de seguridad alimentaria mundial, disminución de los recursos fósiles y la reducción en la producción agrícola derivados de las prácticas agrícolas tradicionales (Oropeza Tosca *et al.*, 2023). La nanotecnología en los agroquímicos ha crecido con el objetivo de mejorar la producción de cultivos y hacerla más sostenible. Las nanopartículas de Hidroxiapatita (nHAp) sintética suministran suficientes nutrientes de P a las plantas, favoreciendo su germinación, crecimiento y desarrollo. El Girasol (*Helianthus annuus*) es un cultivo conocido por su valor nutritivo y económico debido a su contenido de aceites. El objetivo del presente estudio fue evaluar las diferentes dosis de nHAp aplicadas en semillas de girasol. Se utilizaron 100 semillas de la variedad Giant sunflower y se les administró tres diferentes diluciones de nHAp en la etapa de imbibición. Se evaluaron las variables agronómicas en la etapa de germinación y crecimiento del cultivo, el T3 (4000 ppm) logró un 100 % de germinación, siendo el mejor. De acuerdo a los resultados obtenidos, se concluye que la nHAp influye en la germinación del cultivo de girasol (*Helianthus annus*), sin embargo, existen diferencias en los tratamientos aplicados, según la dosis utilizada, mientras que en el tratamiento de 6000 ppm se obtuvieron bajos niveles de germinación, se observó un desarrollo de la plúmula con una mayor circunferencia.

Palabras clave

Nanofertilizantes, *Helianthus annus*, tratamientos, plúmula

ABSTRACT

Use of hydroxyapatite nanoparticles in germination and growth in sunflower cultivation.

Monserrat Pérez Esquivel

Para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Producción Agropecuaria

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Dr. Eduardo Arón Flores Hernández

Agriculture is a fundamental activity worldwide, however, it faces significant challenges such as loss of global food security, declining fossil resources and reduction in agricultural production resulting from traditional agricultural practices. Nanotechnology in agrochemicals has grown with the aim of improving crop production and making it more sustainable. Synthetic Hydroxyapatite nanoparticles supply sufficient P nutrients to plants, favoring their germination, growth and development. Sunflower (*Helianthus annuus*) is a crop known for its nutritional and economic value due to its oil content. The aim of the present study was to evaluate the different doses of hydroxyapatite nanoparticles applied to sunflower seeds. 100 seeds of the Giant sunflower variety were used and three different dilutions of nHAp were administered at the imbibition stage. The agronomic variables were evaluated at the germination and growth stages of the crop, obtaining that the 4000 ppm treatment resulted in 100% germination. According to the results obtained, it is concluded that hydroxyapatite influences the germination of the sunflower crop (*Helianthus annuus*), however, there are differences in the treatments applied, depending on the dose used, while in the 6000 ppm treatment low germination levels were obtained, a development of the plumule with a greater circumference was observed.

Keywords

Nanofertilizers, *Helianthus annuus*, treatments, plumule

I. INTRODUCCIÓN

La agricultura es una actividad fundamental en todo el mundo (Paz-Trejo *et al.*, 2023, Dayal *et al.*, 2021). El sector agrícola enfrenta desafíos significativos, tales como la pérdida de seguridad alimentaria mundial, disminución de los recursos fósiles y la reducción en la producción agrícola derivados de las prácticas agrícolas tradicionales (Ilmudeen *et al.*, 2022). En las últimas seis décadas, los fertilizantes químicos han sido cruciales para aumentar la producción agrícola y garantizar el suministro de alimentos a nivel mundial (Ilmudeen *et al.*, 2022). Estos afectan negativamente al equilibrio inherente de nutrientes del suelo provocando la contaminación ambiental que afecta a la flora y la fauna (Banotra *et al.*, 2017) el uso excesivo de fertilizantes reduce la microflora del suelo y disminuye la fijación de nitrógeno.

La nanotecnología (NT), emerge con su capacidad para generar cambios significativos en diversas áreas científicas y la integración tecnológica (Dey and Nandy, 2024, Lira-Saldivar *et al.*, 2018). El uso de la NT en los agroquímicos ha crecido con el objetivo de mejorar la producción de cultivos y hacerla más sostenible (Paz-Trejo *et al.*, 2023, Balusamy *et al.*, 2023, Chávez-García *et al.*, 2020). Los nanofertilizantes están diseñados para liberar nutrientes de manera más controlada y eficiente, lo que mejora la absorción por parte de las plantas y reduce el desperdicio ya que estos nanofertilizantes pueden penetrar el suelo y las raíces de manera más efectiva, proporcionando los nutrientes directamente donde más se necesitan (Żukowska *et al.*, 2024, Sales *et al.*, 2024).

Según Bantora *et al* (2017) y Chakkalakkal *et al* (2022) las nHAp sintética suministran suficiente P a las plantas. Esta sustancia tiene la fórmula química $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ (Akhtar and Pervez, 2021), y se puede considerar como un tipo de nanofertilizantes de fósforo, que supera a la forma natural del fosfato de roca, debido a su alta solubilidad en agua, también mitigan el problema de la baja disponibilidad de nutrientes que presentan los fertilizantes de fósforo convencionales, además, se considera que los nanomateriales contribuyen a la liberación lenta de fertilizantes (Ilmudeen *et al.*, 2022).

El Girasol (*Helianthus annuus*) es un cultivo conocido por su valor nutritivo y económico debido a su contenido de aceites (Ceylan *et al.*, 2023). Es un cultivo oleaginoso de gran relevancia en el panorama agrícola mundial, tanto por la cantidad de producción que genera como por la calidad de sus productos (Mahapatra *et al.*, 2020). El cual contribuye al 10 % del aceite comestible total producido en el mundo (Rauf *et al.*, 2020b). El girasol es una fuente fundamental de propiedades medicinales que se aprovechan en todo el mundo, tanto como alimento nutritivo (Bashir *et al.*, 2021).

Las semillas de girasol son una de las fuentes nutricionales con grasas insaturadas saludables, así como de proteínas y fibra que son beneficiosas para la salud. También son una excelente fuente de minerales como el selenio, el cobre y el zinc, y proporcionan ácido fólico y hierro, nutrientes esenciales para el organismo además, contienen fitoquímicos que pueden ayudar a prevenir enfermedades (Puraikalan and Scott, 2023). Las semillas son el sistema de entrega para transferir la genética avanzada al campo de producción (Reed *et al.*, 2022).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Nanotecnología

La industria de la NT emergió a principios de los años 90, introduciendo innovadoras propiedades que se aplicaron en diversos sectores tanto públicos como industriales (Paz-Trejo *et al.*, 2023, Khan *et al.*, 2023a).

La palabra "nano" hace referencia a una milmillonésima parte de un metro o una millonésima parte de un milímetro. Es importante recordar que todos los materiales están formados por átomos, que son sus unidades más pequeñas(K.S.Subramanian *et al.*, 2020).

La NT se ha definido generalmente como el control de la materia en una escala que se preocupa de 1 a 100 nm. Más allá de distinguir un intervalo de escala, la definición dada por decir la verdad no especifica un material particular sino más bien una identidad. A pesar de esto, la historia NT ha sido escrita exclusivamente en relación con lo inorgánico, comenzando con la ingeniería mecánica y de materiales, y documenta éxitos en la industria de semiconductores, inventos de microscopios de sonda de barrido SPM y el descubrimiento del nanotubo de carbono(Kim, 2024).

Aunado a las propiedades innovadoras de la nanotecnología, investigaciones con nanopartículas metálicas de sílice, aluminio y óxido de titanio, empleadas en materiales de construcción y otros sectores, han mostrado que se difunden fácilmente, son resistentes, tienen una estructura dimensional única y pueden ingresar en sistemas biológicos(Paz-Trejo *et al.*, 2023).

La NT, con su capacidad para generar cambios significativos en la sociedad, ha abierto un camino innovador y emocionante para la unión de diversas áreas científicas y la integración tecnológica (Dey and Nandy, 2024).

2.1.1 Actualidad

El impacto de los nanomateriales en el medio ambiente, tanto sus riesgos como sus beneficios, es un tema de gran controversia en la actualidad, la comunidad científica está dedicando un esfuerzo considerable para estudiar y evaluar las

posibles consecuencias, positivas y negativas, que estos materiales pueden tener en los ecosistemas y en la salud humana (Dey and Nandy, 2024, Źukowska *et al.*, 2024).

Debido al gran impacto que ha tenido la NT que en el año 2004 la Real Academia de Ingeniería de España recomendó restringir su uso debido a la falta de conocimiento sobre su seguridad el principal desafío de esta tecnología radica en la necesidad de una definición globalmente aceptada, actualmente existen varias definiciones para su implementación y características físicas, incluyendo términos como nanomaterial, nanoescala, nanopartículas y nanoobjeto. Una de las definiciones más reconocidas es la de "cualquier material entre 1 y 100 nm", establecida por la Unión Europea y otras organizaciones (Paz-Trejo *et al.*, 2023, Cruz-Lopes *et al.*, 2021, Dey and Nandy, 2024).

Los avances en la nanociencia y la nanotecnología pronto podrían desencadenar una nueva revolución en la agricultura, siempre y cuando los agricultores muestren disposición para capacitarse y así mejorar el manejo de los cultivos (Dey and Nandy, 2024, Wu and Li, 2022).

Existen alternativas prometedoras que emplear fertilizantes basados en nanotecnología. Estos fertilizantes avanzados están diseñados para liberar nutrientes de manera más controlada y eficiente, lo que mejora la absorción por parte de las plantas y reduce el desperdicio ya que estos nanofertilizantes pueden penetrar el suelo y las raíces de manera más efectiva, proporcionando los nutrientes directamente donde más se necesitan (Źukowska *et al.*, 2024).

2.1.2 Aplicaciones en medicina

En las últimas décadas, los medicamentos naturales se están haciendo un hueco en la terapia contra el cáncer. Pero a su vez, los principios activos de estos medicamentos tienen desventajas que incluyen una baja solubilidad y biodisponibilidad. Estos desafíos pueden superarse utilizando nanopartículas NPs que poseen una excelente capacidad de orientación (Pastelín-Solano *et al.*, 2020). Todas las preparaciones están destinadas a tres niveles: tejidos, células y orgánulos diana(Hu *et al.*, 2023).

En medicina los nanotransportadores han conseguido gran atención debido a que han demostrado: excelente estabilidad, mayor capacidad de absorción, un efecto de liberación sostenido mejorado y capacidad de direccionalidad mejorada(Qiu *et al.*, 2023)

Los principales tipos de nanotransportadores son liposomas, transportadores lipídicos nanoestructurados, partículas de lípidos sólidos, micro emulsiones, transportadores poliméricos, transportadores inorgánicos, transportadores híbridos y transportadores basados en pre-fármacos, por lo tanto, se puede afirmar que los nanotransportadores han demostrado un alto potencial para mejorar la eficacia de las MTC en función de los problemas antes mencionados asociados con su uso clínico (Qiu *et al.*, 2023).

2.1.3 Aplicaciones en la agricultura

La agricultura es una actividad fundamental en todo el mundo, seguida por la ganadería, la pesca, la minería y la explotación forestal. Su impacto en la vida humana es vital, ya que proporciona alimentos y materias primas a las poblaciones y es el pilar de la economía de la sociedad. En 1999, los campos de cultivo y pastizales ocupaban el 37% de la tierra cultivable a nivel mundial, y esta cifra ha aumentado entre un 10% y un 15% en la actualidad. Se estima que, en 30 años, los países en desarrollo necesitarán 120 millones de hectáreas adicionales para la agricultura debido al crecimiento demográfico (Paz-Trejo *et al.*, 2023, Banotra *et al.*, 2017).

El sector agrícola enfrenta desafíos significativos, tales como la pérdida de seguridad alimentaria mundial, el cambio climático, la disminución de los recursos fósiles, la contaminación de las aguas subterráneas, la erosión del suelo, la reducción en la producción agrícola y los cultivos infructuosos, todos ellos derivados de las prácticas agrícolas tradicionales. Si bien los agroquímicos han mejorado la producción de cultivos y controlado plagas y enfermedades, también han generado riesgos negativos a largo plazo. En las últimas seis décadas, los fertilizantes químicos han sido cruciales para aumentar la producción agrícola y

garantizar el suministro de alimentos a nivel mundial. Sin embargo, su uso ha provocado diversos problemas, como la contaminación de las aguas subterráneas, la acidificación y salinización del suelo, la degradación de la fertilidad del suelo, la pérdida de biodiversidad y el alto consumo de energía en los procesos de síntesis (Ilmudeen *et al.*, 2022, Mejía and Reyes, 2020). La agricultura es una de las muchas áreas científicas que están especialmente favorables en la creciente ciencia de la nanotecnología (Nawaz *et al.*, 2024).

Desde principios del siglo XXI, el uso de la NT en los agroquímicos ha crecido con el objetivo de mejorar la producción de cultivos y hacerla más sostenible; sin embargo, a nivel mundial, aún existen diferencias en la regulación de la NT , incluyendo su definición, etiquetado, notificación específica y las directrices sobre toxicidad o evaluación de riesgos; Asia se destaca como el líder en producción académica en este campo, mientras que Estados Unidos y Alemania son los países con más patentes de nanomateriales destinados a la agricultura (Paz-Trejo *et al.*, 2023).

Las principales herramientas en la agricultura a escala nanométrica son los nanomateriales diseñados, que tienen partículas de entre 1 y 100 nm; gracias a su alta relación área superficial-masa, estos nanomateriales presentan propiedades muy distintas a las de los materiales convencionales en grandes cantidades; además, la manipulación de la materia a nivel nanométrico ha abierto nuevas posibilidades para la creación de materiales innovadores y la construcción de estructuras nanohíbridas (Fellet *et al.*, 2021).

La NT está avanzando rápidamente y tiene el poder de revolucionar la agricultura y los sistemas alimentarios, mejorando así las condiciones de vida de la población humana desfavorecida del mundo, el término nano agricultura se usa en este estudio para hacer referencia a la aplicación de nanotecnología y nanociencia en ciencias agrícolas y a través de la creación de sistemas y productos que proporcionan insumos de manera precisa, mejoran la productividad sin dañar el medio ambiente; en términos de avances tecnológicos en el sistema agrícola, el contexto de India lo presenta como un país donde los sistemas de producción

agrícola se están moviendo hacia una agricultura más precisa y eficiente (K.S.Subramanian *et al.*, 2020, Zarei *et al.*, 2023).

2.2 Hidroxiapatita

Generalmente conocida como hidroxiapatita (HA), esta sustancia tiene la fórmula química $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ (Akhtar and Pervez, 2021).

2.2.1 Antecedentes

El compuesto de fosfato de calcio, bien conocido en la comunidad científica, ha despertado un gran interés en diversos campos debido a sus propiedades únicas, estas características excepcionales han llevado a su uso en áreas como la medicina, especialmente en la regeneración ósea y dental, así como en la fabricación de biocerámicas y biomateriales avanzados su capacidad para imitar la composición y estructura de los huesos humanos lo convierte en un material muy valorado para aplicaciones. (Benataya *et al.*, 2024, Edna *et al.*, 2023).

Se distingue de otros fosfatos de calcio por su isomorfismo, estabilidad térmica y química, su estequiometría de composición, y sus propiedades estructurales que son muy similares a los esqueletos de humanos y otros organismos vivos (Vokhidova *et al.*, 2022).

El calcio y el fósforo son elementos esenciales para la formación y mantenimiento de los sistemas de soporte en los organismos vivos. La falta de estos minerales puede provocar un debilitamiento de los huesos, aumentando el riesgo de fracturas y fisuras. También puede contribuir a la aparición de osteoporosis, caries dentales, cambios en el apetito y el peso, entumecimiento y retroceso(Vokhidova *et al.*, 2022).

2.2.2 Aplicaciones

Los fosfatos de calcio sintéticos (PC) son biomateriales de gran relevancia debido a su alta bioactividad en huesos humanos y tejidos dentales biomineralizados, estas biocerámicas se utilizan ampliamente para el tratamiento de defectos óseos, ya que su composición química es muy similar a la de los minerales presentes en los huesos, lo que les confiere una excelente biocompatibilidad. Es

interesante notar que el componente mineral de los huesos y dientes es una forma de hidroxiapatita de calcio, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, conocida como CHAp (Ishikawa *et al.*, 2020).

2.3 Nanopartículas de hidroxiapatita

Es fundamental y relevante comprender la química, producción, reactividad y los posibles procesos de las nanopartículas (NP) y su interacción con componentes naturales, esta necesidad ha llevado a los científicos a investigar el impacto de ciertas nanopartículas diseñadas (ENP) en diversos sistemas vegetales para entender la movilidad, reactividad, toxicidad y persistencia de distintos ENP para evaluar adecuadamente los riesgos que se presenten en el medio ambiente (Dey and Nandy, 2024, Albis Arrieta *et al.*, 2021).

Las nanopartículas de hidroxiapatita modificada con ácido cítrico, un tipo de nanofertilizantes de fósforo, superan a la forma natural del fosfato de roca, debido a su alta solubilidad en agua, también mitigan el problema de la baja disponibilidad de nutrientes que presentan los fertilizantes de fósforo convencionales, además, se considera que los nanomateriales contribuyen a la liberación lenta de fertilizantes (Ilmudeen *et al.*, 2022, Estrada-Arellano *et al.*, 2023).

2.3.1 Usos y aplicaciones

Las nHAp han sido aplicadas en diversos aspectos, uno de ellos es el uso en la nutrición animal, logrando obtener una fuente de suplementación eficiente en las dietas ofrecidas a los mismos, un ejemplo de ello es en la dieta de las aves de corral, que además de proporcionar los minerales necesarios para su crecimiento y desarrollo, ha demostrado ser eficiente y productiva en la calidad de la carne, características óseas y su estado de salud en general (Matuszewski *et al.*, 2021, da Silva *et al.*, 2023).

En el ámbito de la agricultura, las nanopartículas están encontrando diversas aplicaciones innovadoras. Una de las principales es su uso como

nanofertilizantes, donde estas pequeñas partículas pueden liberar nutrientes de manera más eficiente y controlada, mejorando la salud de las plantas y reduciendo la necesidad de fertilizantes convencionales. Las nanopartículas también se emplean como nanopesticidas y nanofertilizantes (Balusamy *et al.*, 2023, Sharma *et al.*, 2024).

En el ámbito de los productos cosméticos, los NP son utilizadas para mejorar la estabilidad y la penetración de los ingredientes activos en la piel, además, en la industria alimentaria, se utilizan para encapsular nutrientes y sabores, lo que mejora la estabilidad y la biodisponibilidad de los componentes beneficiosos en los alimentos (Qiu *et al.*, 2023).

2.3.2 Nanopartículas de hidroxiapatita aplicadas en la agricultura

2.3.2.1 Nanofertilizantes

Los nanopesticidas se deben describir en la definición oficial de nanoescala, que abarca tamaños de partículas entre 1 y 100 nanómetros, debido a su tamaño diminuto, tienen el potencial de ofrecer una mayor precisión y eficacia en el control de plagas, reduciendo así el uso de productos químicos tradicionales y minimizando el impacto ambiental (Paz-Trejo *et al.*, 2023, Yan *et al.*, 2023).

Los nanofertilizantes son versiones mejoradas o sintéticas de los fertilizantes tradicionales. Estos incluyen fertilizantes complejos y extractos de distintas partes vegetativas o reproductivas de las plantas, que se desarrollan mediante diversos métodos biológicos, químicos, físicos y mecánicos el objetivo principal de los nanofertilizantes es mejorar la calidad y eficiencia de la producción agrícola (Ilmudeen *et al.*, 2022, Yıldırım and Ay, 2023).

Gracias a su diminuto tamaño, los nanofertilizantes cuentan con una amplia superficie que permite un uso más eficiente de los nutrientes. Esta extensa superficie proporciona múltiples sitios para diversas reacciones metabólicas en las plantas, el tamaño reducido de las nanopartículas, inferior al de los poros de

las hojas y raíces, facilita una mayor penetración de nutrientes desde el exterior hacia las raíces y hojas de la planta (Ilmudeen *et al.*, 2022).

2.3.2.2 Nanoplaguicidas

La necesidad de proteger los cultivos contra las plagas surgió del temor a perder cosechas. Aunque ya en el año 1000 d.C. Homero mencionaba el uso del azufre como fungicida, no fue hasta el siglo XX, durante la Segunda Guerra Mundial, que comenzó la exploración e investigación de productos orgánicos sintéticos para desarrollar pesticidas. En la década de 1940, muchas sustancias utilizadas como pesticidas fueron inicialmente creadas como armas químicas para la guerra, su aplicación como pesticida revolucionó la agricultura las ventajas de estos productos eran numerosas, y en 1948 Müller ganó el Premio Nobel por salvar millones de vidas mediante el uso del DDT para combatir organismos causantes de enfermedades y proteger numerosos campos de cultivo (Paz-Trejo *et al.*, 2023).

Las zonas con altitudes climáticas adecuadas pueden competir con países que tienen condiciones ambientales óptimas para la producción de alimentos que, de otro modo, serían difíciles de obtener, esta ventaja competitiva se debe, en gran medida, al uso de agroquímicos como fertilizantes y pesticidas (Paz-Trejo *et al.*, 2023).

2.4 Cultivo de girasol

La planta de girasol tiene estructuras esenciales: raíces, tallos, hojas, flores y semillas (Fig. 1), la raíz principal, robusta y profunda, puede alcanzar entre 150 y 270 cm de profundidad, extendiéndose lateralmente hasta 150 cm, el tallo es rígido y grueso, llegando a medir entre 1 y 3 metros de altura, con algunas variedades presentando ramificaciones, el tamaño y la estructura del tallo varían según la variedad y el entorno, las hojas, que son opuestas en la parte inferior del tallo y alternas en la superior, varían en forma y color, de verde claro a verde oscuro y las flores, en forma de plato, se encuentran en la parte superior del tallo

principal o de las ramas, con diámetros que varían de 6 a 37 cm (Puttha *et al.*, 2023, Arshad *et al.*, 2020).

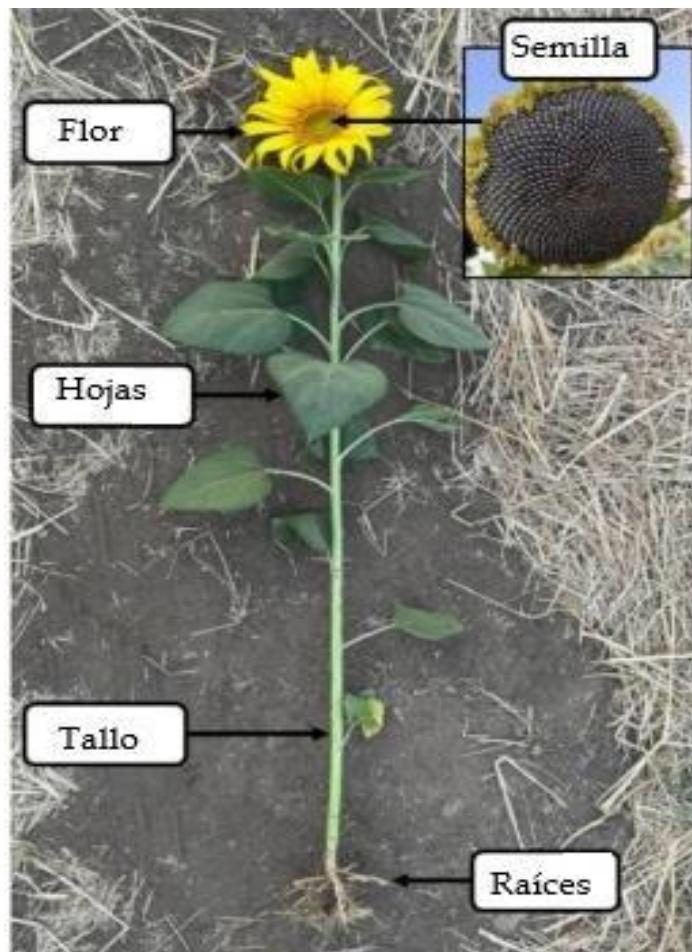


Figura 1. Partes de la planta de girasol (texto cambiado al español) (Puttha *et al.*, 2023).

Los girasoles forman parte de la familia Asteraceae, un grupo de plantas conocidas por su valor nutritivo y económico debido a su contenido de aceites. Dentro de esta familia, los girasoles destacan no solo por su belleza, sino también por su utilidad en la producción de aceite y otros productos nutritivos (Ceylan *et al.*, 2023). La familia Asteraceae, también conocida como Compositae, es una de las familias de plantas más grandes del mundo, con más de 600 géneros y alrededor de 25,000 especies conocida como la familia de los girasoles, esta familia incluye una variedad de plantas muy conocidas, como los girasoles, las dalias, las margaritas, la lechuga, la achicoria y la coreopsis (Borgo *et al.*, 2024).

Estas plantas han sido cultivadas durante mucho tiempo debido a su valor nutricional, sus propiedades medicinales y su atractivo ornamental. El girasol tiene sus raíces en el este de América del Norte, y existen pruebas que sugieren que también fue cultivado en México (Rauf *et al.*, 2020b).

Los cultivos de oleaginosas, como el girasol, son la segunda fuente de alimentos más relevante después de los cereales, su amplia distribución a nivel mundial se debe a la gran demanda de aceites vegetales comestible, este cultivo tiene un potencial al ser muy competitivo debido a su diversidad genética (Guirrou *et al.*, 2024).

Las semillas de girasol contienen entre un 30% y un 50% de aceite y entre un 20% y un 30% de proteínas; son ricas en tocoferoles, fitoesteroles y micronutrientes esenciales como calcio, zinc, selenio, fósforo y hierro (Rauf *et al.*, 2020a).

2.4.1 Usos

El cultivo del girasol cumple con dos propósitos fundamentales, por un lado, se cultiva para la producción de aceite de girasol, que es ampliamente utilizado en la cocina debido a sus propiedades saludables, sabor y aroma agradable, además de su alto contenido en vitaminas A, D, E y K; las semillas de girasol se producen para el consumo directo, ya sea como un snack popular y nutritivo o como ingrediente en una variedad de alimentos y productos alimenticios. Esta dualidad en su cultivo permite que el girasol sea una planta de gran importancia tanto en la industria alimentaria (Matysiak, 2024).

El aceite de girasol es una fuente valiosa de ácido linoleico, beneficioso para nuestra salud. Este aceite está compuesto en su mayoría por ácidos grasos (alrededor del 90%), junto con fitoesteroles (9%) y una pequeña pero importante cantidad de vitamina E (1%). Estos componentes no solo ayudan a reducir el colesterol malo, sino que también fortalecen nuestro sistema inmunológico y protegen contra enfermedades del corazón (Rauf *et al.*, 2020b).

La harina de girasol es una excelente fuente de proteínas. No solo complementa la harina de soja en términos de necesidades nutricionales, sino que también es una opción sabrosa, rica en proteínas y fibra, y con un alto contenido de forraje. La harina de girasol tiene el potencial de reemplazar la harina de soja en las dietas de las aves de corral. (Roy *et al.*, 2024). La harina de semillas de girasol se usaba para hacer pasteles, pan y se combinaba con otras verduras y maíz para preparar comidas, las semillas eran un bocadillo muy querido por los nativos de América del Norte (Rauf *et al.*, 2020a).

Uno de sus usos en medicina es antifúngico: el pie de atleta, conocido médicaamente como tiña del pie, causada por hongos del género *Trichophyton*. Un tratamiento efectivo para esta afección es Oleozon, un aceite de girasol (*Helianthus annuus*) ozonizado; En un estudio realizado con 200 personas, este aceite demostró resultados muy positivos, al aplicarlo dos veces al día durante aproximadamente 42 días, muchos participantes vieron una notable mejoría en su condición. Este tratamiento no solo ayudó a eliminar la infección, sino que también contribuyó a prevenir su reaparición, ofreciendo una solución eficaz y accesible para quienes padecen de esta incómoda y común afección(Mahalik, 2022).

2.4.2 Importancia

La planta de girasol, apreciada por su gran belleza, se cultivaba en los jardines europeos como una planta ornamental, además de su uso decorativo, también se aprovechaba una pequeña escala con fines medicinales (Rauf *et al.*, 2020a). Es comercializada a lo largo del mundo y se destaca por su valor medicinal y nutricional (Guo *et al.*, 2021, Bhatla *et al.*, 2021). El girasol es una planta ornamental significativa que se puede emplear tanto como flor cortada como en arreglos en macetas (Wu *et al.*, 2023). Destacan por su impresionante belleza, resalta por su curioso comportamiento heliotrópico, siguiendo el movimiento del sol a lo largo del día (Rauf *et al.*, 2020a). Por la mañana, las hojas están orientadas hacia el este y por la tarde se dirigen hacia el oeste, sin embargo, este

movimiento disminuye gradualmente durante las etapas de polinización (Puttha *et al.*, 2023).

El girasol es considerado uno de los tres principales cultivos de forma extensiva, junto con el maíz y la soya (Popov *et al.*, 2021). La producción de girasol alcanza casi 23 millones de hectáreas anuales en alrededor de 60 países. Este cultivo se sitúa como el segundo híbrido más relevante y ocupa el quinto lugar entre las semillas oleaginosas más importantes (Roy *et al.*, 2024). El girasol (*Helianthus annuus L.*) ocupa el cuarto lugar entre los cultivos oleaginosos más importantes a nivel mundial de esta producción global de girasol, hasta un 70% se lleva a cabo en Europa (Matysiak, 2024).

El cultivo de girasol es de suma importancia económica que se puede procesar para obtener una variedad de productos y subproductos vea fig. 2 (Puttha *et al.*, 2023).



Figura 2. Productos y subproductos obtenidos del cultivo *Helianthus annuus* (texto cambiado al español) (Roy *et al.*, 2024).

2.4.3 Semillas de Girasol

Las semillas no solo son fundamentales para la propagación de cultivos, permitiendo que los agricultores produzcan alimentos y otros productos agrícolas, sino que también desempeñan un papel crucial en la conservación de las especies en su entorno natural. Al dispersarse, las semillas ayudan a mantener la biodiversidad y la estabilidad de los ecosistemas, asegurando que las plantas continúen creciendo y reproduciéndose en su hábitat natural (El-Maarouf-Bouteau, 2022).

La semilla de girasol contribuye aproximadamente con el 10% de la producción total de aceite comestible del mundo (Rauf *et al.*, 2020a).

Estas semillas son unas de las principales productoras de aceite a nivel mundial. Las plantas son robustas y tolerantes a la sequía, lo que las hace ideales para áreas áridas donde muchos otros cultivos no pueden sobrevivir. Una vez maduras, las semillas suelen estar expuestas en la parte superior de la planta. Estas semillas están compuestas por una capa exterior llamada epicarpio, una capa media conocida como mesocarpio y una capa interna (Adeleke *et al.*, 2020, Nafisa *et al.*, 2020).

También están llenas de sustancias activas beneficiosas entre ellas se encuentran el β-sitosterol, flavonoides y ácido linoleico además, estas semillas contienen omega 9, omega 6, vitamina E, lecitina, tocoferoles y carotenoides, todos los cuales aportan múltiples beneficios, otros ingredientes presentes en las semillas son los compuestos fenólicos que se pueden utilizar como antibacterianos (Amirul and Medicine, 2020). Las semillas de girasol contienen compuestos fenólicos del 2% al 4% (Adeleke *et al.*, 2020).

Las semillas de girasol se pueden clasificar en tres categorías:

1. Las negras oleaginosas tienen una cáscara negra y sólida, comúnmente conocidas como cultivos de semillas oleaginosas. De estas semillas, se extrae aceite mediante un proceso de prensado

2. Las semillas de girasol rayadas que se utilizan principalmente como alimento, son también conocidas como semillas de confitería o semillas de girasol para chocolate y sin cáscara.
3. Sin cascara son populares por su sabor y se emplean en una variedad de productos, desde snacks hasta deliciosos postres (Puraikalan and Scott, 2023).

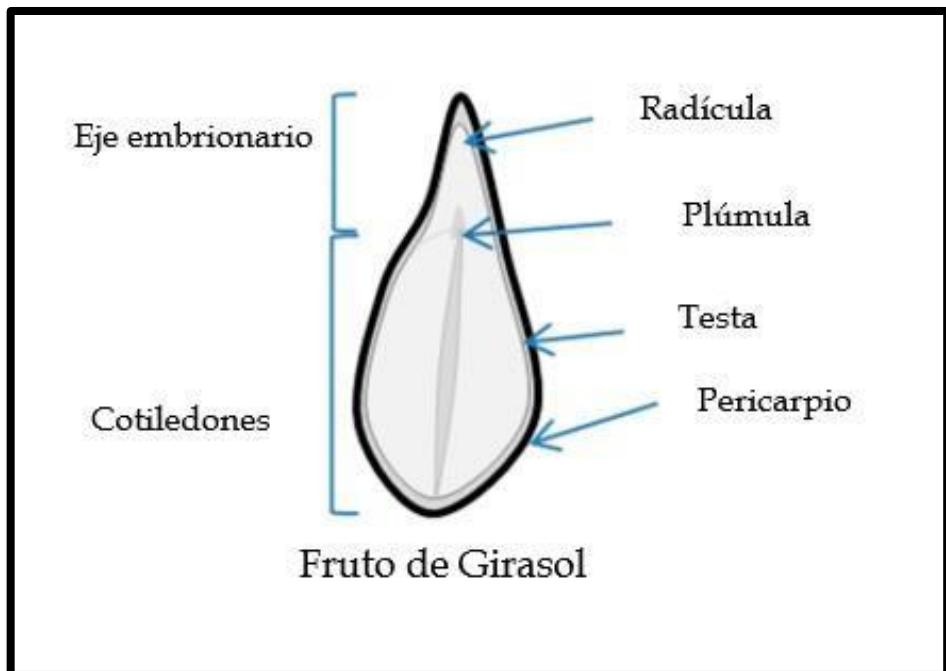


Figura 3. Morfología de la semilla de girasol (texto cambiado al español) (El-Maarouf-Bouteau, 2022).

2.5 Germinación

La germinación de las semillas es crucial para el crecimiento de una nueva planta, ya sea en la agricultura o en su entorno natural, este proceso inicial es fundamental para asegurar que las plantas puedan establecerse, crecer y desarrollarse correctamente, en la agricultura, una buena germinación es esencial para obtener cosechas abundantes y saludables (El-Maarouf-Bouteau, 2022, García-López *et al.*, 2016, Carrera-Castaño *et al.*, 2020, Jue *et al.*, 2024).

La primera etapa de del desarrollo y crecimiento de las semillas en su ciclo de vida es la germinación., para que las plantas crezcan y se desarrollen adecuadamente, es esencial que las semillas tengan una alta capacidad de germinación (Li *et al.*, 2020, Khan *et al.*, 2023b). La germinación rápida y sincrónica de las semillas y el crecimiento de las plántulas son particularmente importantes para la producción agrícola porque son esenciales para el establecimiento de las plántulas en el campo (Reed *et al.*, 2022).

En las plantas que producen semillas, el embrión, que es la futura planta en su etapa inicial, está cuidadosamente protegido por una capa conocida como cubierta seminal. Esta cubierta no aparece de la nada; se forma a partir del tegumento, una estructura que se desarrolla durante el crecimiento del óvulo. Este proceso es crucial para asegurar que el embrión tenga un entorno seguro y adecuado para su desarrollo, protegiéndolo de factores externos y ayudando a que germine adecuadamente cuando las condiciones sean favorables(Lee and Yeung, 2023).

La cubierta de la semilla, al envolver completamente al embrión, desempeña un papel crucial para la futura planta, actúa como una fuente de nutrientes, proporcionando todo lo necesario para que el embrión pueda desarrollarse adecuadamente, además, brinda una protección física indispensable, resguardando al embrión de cualquier daño o amenaza externa durante su periodo de gestación. Esta combinación de nutrición y protección asegura que el embrión tenga todo lo necesario para crecer de manera segura y saludable, preparándolo para el momento en que estará listo para germinar y convertirse en una planta. Así, la cubierta de la semilla no solo es una barrera, sino un sistema de soporte integral que cuida y alimenta al embrión en su etapa más vulnerable.

La calidad fisiológica de las semillas se refiere a un conjunto de propiedades y características que determinan el rendimiento y el éxito del cultivo. Estas propiedades afectan varios aspectos del crecimiento de las plantas, desde la

germinación hasta el desarrollo inicial de las plántulas. Cuando las semillas tienen una alta calidad fisiológica, tienen un mayor potencial para germinar de manera uniforme y vigorosa, lo que resulta en cultivos más saludables y productivos (García-López *et al.*, 2016).

La germinación de las semillas inicia cuando estas absorben agua, y finaliza con la aparición de la radícula, que es la primera raíz de la planta. Este proceso de absorción de agua se desarrolla en tres fases distintas. Durante cada fase, se llevan a cabo diversos procesos fisiológicos que son esenciales para que la semilla pueda activarse y empezar a crecer (Mahamba and Palamuleni, 2024). La primera fase implica la rápida absorción de agua, lo que despierta las funciones metabólicas de la semilla. En la segunda fase, la absorción de agua se estabiliza y la semilla comienza a metabolizar las reservas almacenadas, preparándose para el crecimiento. Finalmente, en la tercera fase, la radícula emerge, marcando el comienzo del desarrollo de la planta (El-Maarouf-Bouteau, 2022).

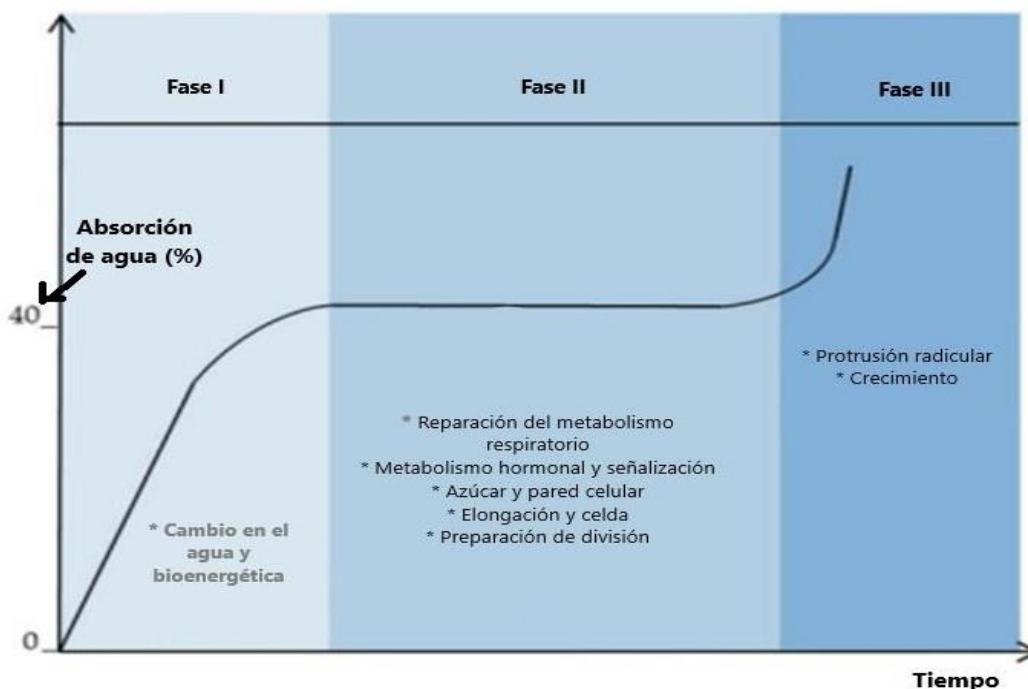


Figura 4. Fases características del proceso de germinación de las semillas (texto cambiado al español) (El-Maarouf-Bouteau, 2022).

2.5.1 Imbibición

La absorción de agua por parte de las semillas ocurre en tres etapas: primero, la imbibición, donde la semilla toma agua y se hincha; luego, la activación, donde se inicia la germinación; y finalmente, el crecimiento del embrión y la radícula o epicótilo, que es cuando la semilla comienza a desarrollarse en una planta. Durante la preparación de las semillas para su almacenamiento, se interrumpe la imbibición al inicio de la fase de crecimiento, y las semillas se secan nuevamente para conservarlas adecuadamente (Pedrini *et al.*, 2020).

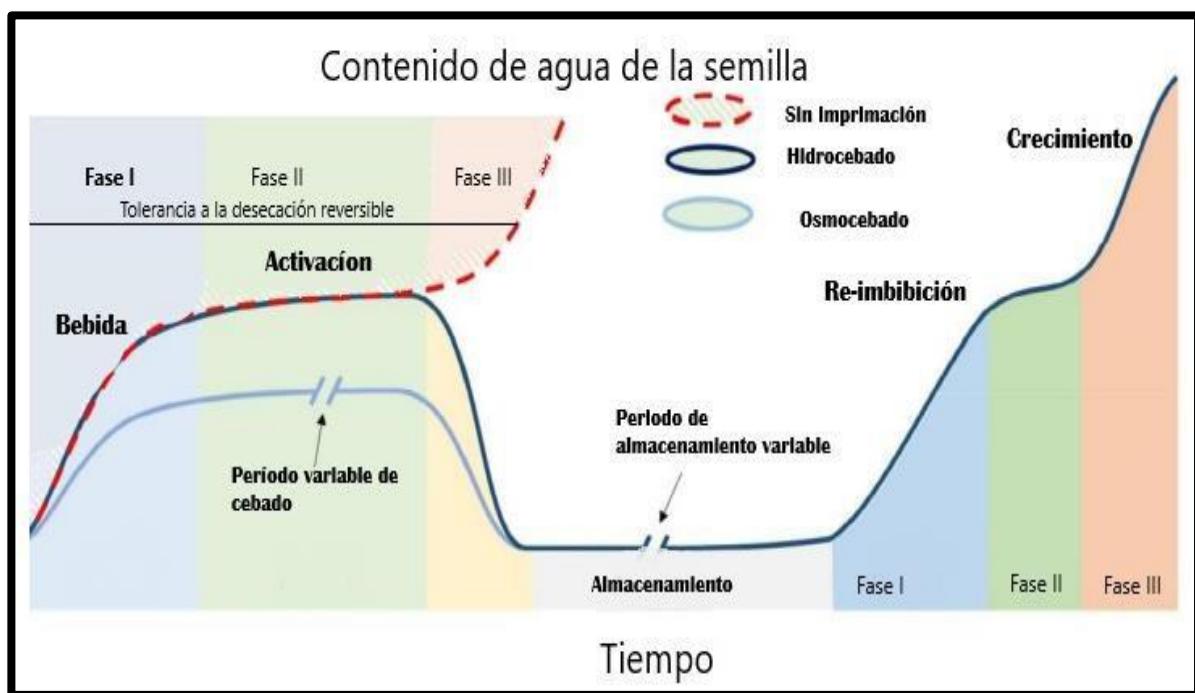


Figura 5. Imagen explicativa de la absorción de agua por parte de las semillas (texto cambiado al español) (Pedrini *et al.*, 2020).

Las especies reactivas de oxígeno (ROS) son fundamentales en el proceso de germinación de las semillas, ya que su función varía según la concentración presente, cuando las semillas se recolectan, suelen estar en un estado de latencia, con bajos niveles de ROS, lo que impide que las señales hormonales necesarias para germinar se activen. A medida que la semilla se almacena, los niveles de ROS aumentan hasta llegar a lo que se denomina la "ventana oxidativa"(Wang *et al.*, 2024).

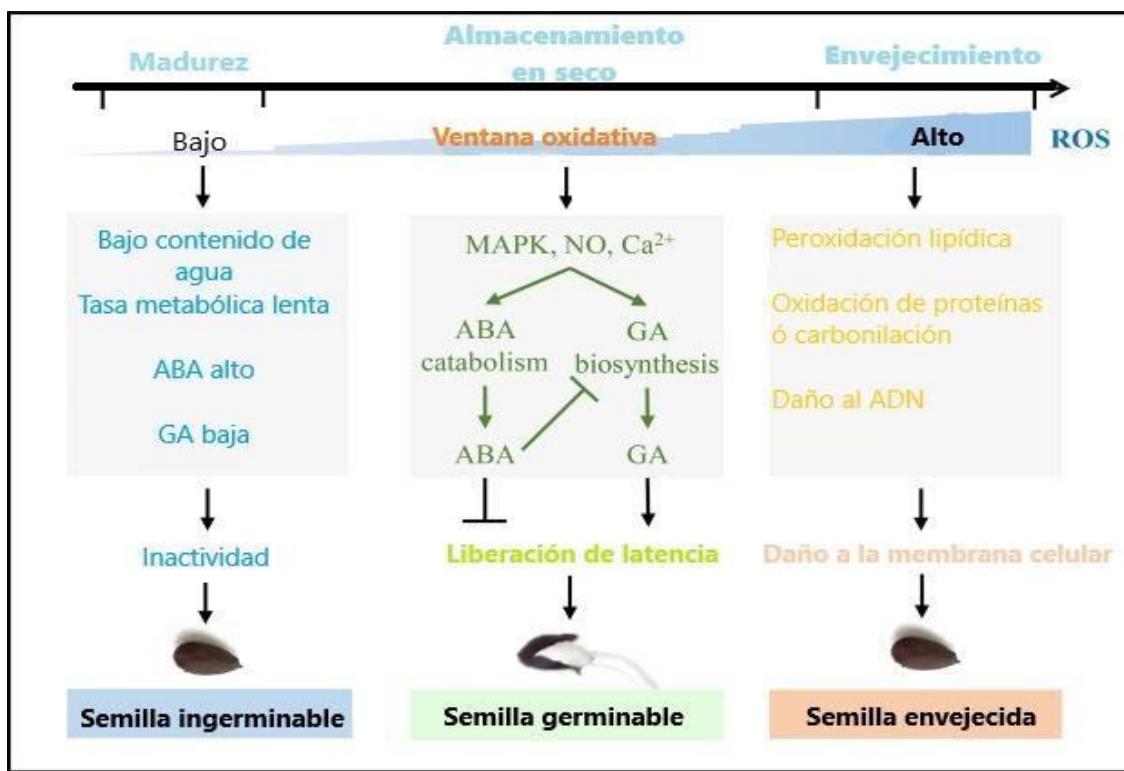


Figura 6. Etapas descriptivas de las ROS (texto cambiado al español) (Wang *et al.*, 2024).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

El presente estudio se llevó a cabo en el municipio de Torreón perteneciente al estado de Coahuila, México. Esta región se encuentra al noroeste de México y en el semidesierto de México, limita al norte y al este con el municipio de Matamoros; al sur y al oeste con el estado de Durango (INEGI, 2020).

A lo largo de los años, la región ha evolucionado significativamente, transformándose de una zona dedicada exclusivamente al cultivo de algodón en un área próspera tanto en la agricultura como en la ganadería (Lozano, 2024).

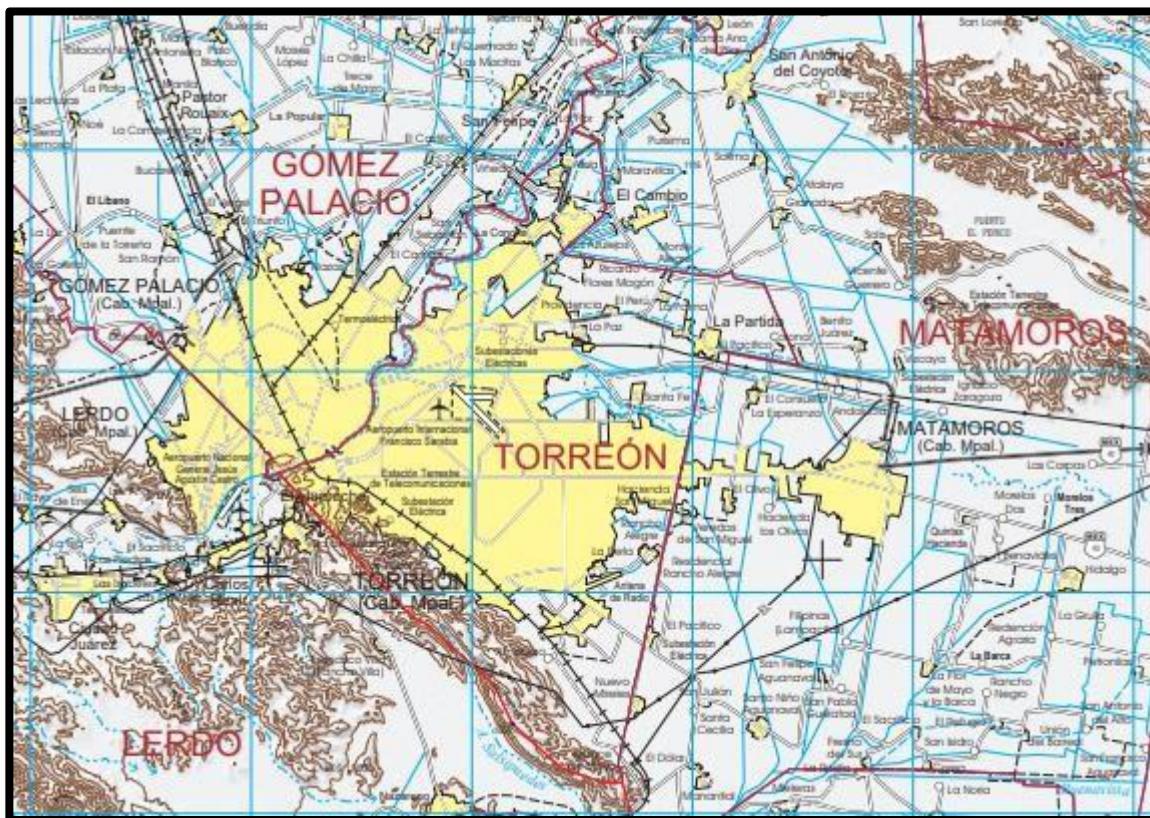


Figura 7. Imagen cartográfica del municipio de Torreón, Coahuila (INEGI, 2023).

El presente proyecto se llevó a cabo en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna, ubicado en la ciudad de Torreón, Coahuila, México. Las coordenadas geográficas son 25°33'19"N 103°22'14"W con dirección en el Periférico Raúl López Sánchez S/N colonia Valle Verde, CP 27054, Torreón, Coahuila.



Figura 9. Instalaciones de la UAAAN (Torreón, 2020).

3.2 Clima

En el municipio de Torreón, Coahuila se presenta un clima muy seco, la temperatura media anual es de 18 a 22°C, las lluvias son muy escasas, se presentan durante el verano; la precipitación total anual es alrededor de 400 mm. se han registrado temperaturas máximas extremas mayores de 40°C julio-septiembre (INEGI, 2020)

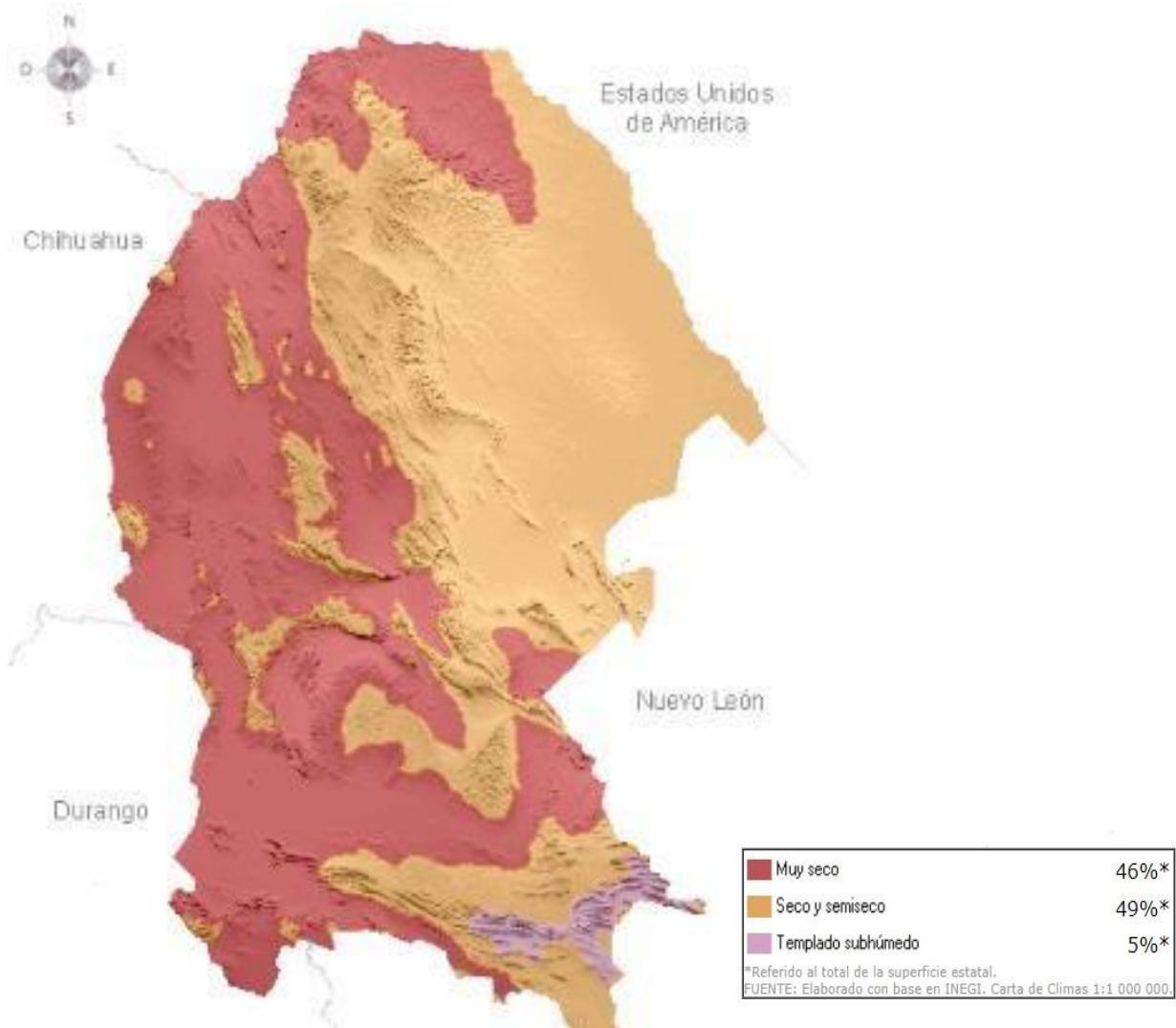


Figura 8. Mapa del Estado de Coahuila representando el tipo de clima (INEGI, 2020)

3.3. Selección de las semillas

Las semillas de la variedad Giant Sunflower, que se utilizaron en este proyecto, fueron adquiridas a través del proveedor Hortaflor. La variedad Giant Sunflower

se seleccionó por sus características específicas que se alinean con los objetivos de la investigación (Seiler *et al.*, 2023, Baldwin *et al.*, 2024, Borgo *et al.*, 2024). Las semillas fueron cuidadosamente seleccionadas, eligiendo aquellas que destacaban por su atractivo visual, tamaño (2 cm) y color (oscuro con línea vertical blanca).



Figura 10. Semillas de girasol seleccionadas para el experimento.

3.4 Establecimiento del experimento

Una vez seleccionadas, se eliminaron el polvo y las impurezas que pudieran tener. Se tomaron 100 semillas y se dividieron en grupos de 25, colocándolas en cajas Petri estériles con un diámetro de 100 mm con una altura de 15 mm.

La calidad fisiológica de una semilla engloba el conjunto de propiedades y características que definen su capacidad potencial para desarrollarse (García-López *et al.*, 2016).



Figura 11. Cajas Petri (100x15 mm) previamente limpias.

Para el experimento, se prepararon tres soluciones diferentes de NP de hidroxiapatita utilizando agua destilada como diluyente. La primera solución, denominada Tratamiento 1 (T1), contenía una concentración de 2000 ppm. La segunda solución, Tratamiento 2 (T2), tenía una concentración de 4000 ppm, y la tercera solución, Tratamiento 3 (T3), alcanzaba los 6000 ppm. Cada una de estas soluciones se administró a tres cajas Petri, aplicando 20 ml de la respectiva solución en para cada tratamiento, se estableció un tratamiento de control, mencionado como Tratamiento 4 (T4), que solo contenía agua destilada. Todas las aplicaciones de los tratamientos se realizaron una sola vez durante la etapa de imbibición, asegurando así la uniformidad del proceso experimental.

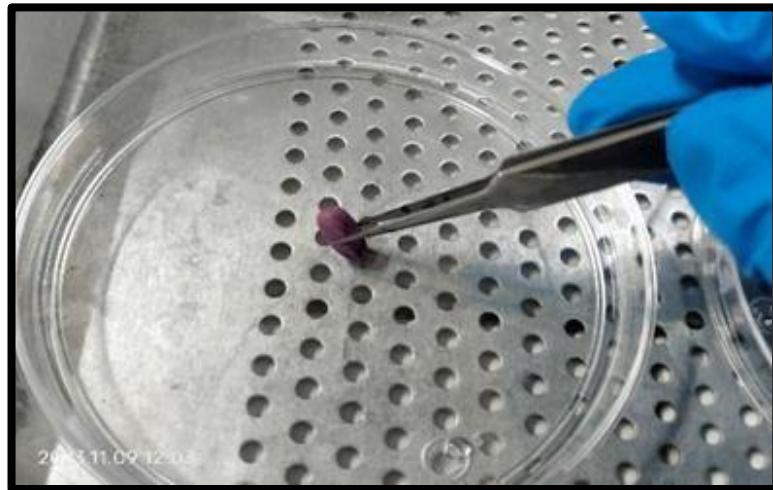


Figura 12. Disposición de semilla en caja Petri.

Las cajas Petri fueron cuidadosamente cubiertas y mantenidas a una temperatura constante de 25 °C. Este proceso se llevó a cabo durante un período de 30 horas dentro de una cámara de crecimiento especialmente diseñada para plantas. Este equipo, fabricado por LAB-LINE INSTRUMENTS, INC, y específicamente el modelo N° 464RH, garantizó un entorno controlado. Durante todo este tiempo, las cajas Petri permanecieron en completa oscuridad, creando así las condiciones óptimas para el desarrollo adecuado de las semillas y asegurando

que el experimento se realizara bajo circunstancias ideales (*Carrera-Castaño et al.*, 2020).

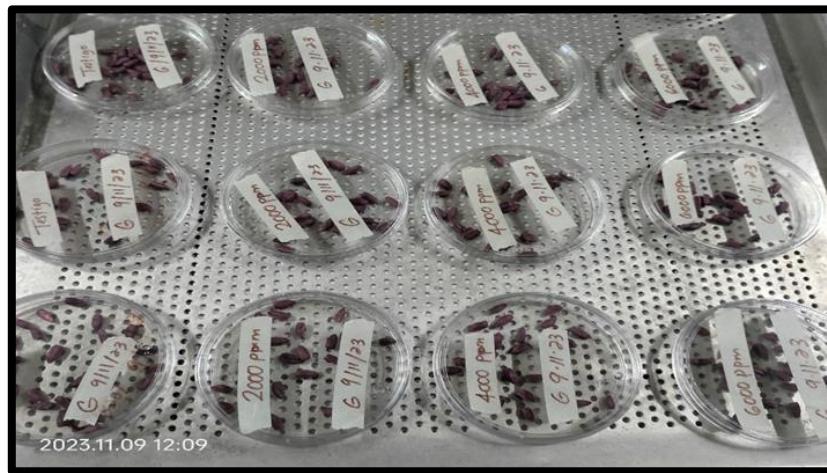


Figura 13. Cajas Petri previamente etiquetadas con las diferentes dosis de nHAp.

El proceso de imbibición implica la absorción de agua por parte de las semillas, lo cual estimula directamente al embrión y activa la etapa de pre-germinación, a medida que las semillas absorben agua, sus tejidos se rehidratan, lo que desencadena una serie de reacciones bioquímicas vitales para el inicio de la germinación (Mejía and Reyes, 2020).

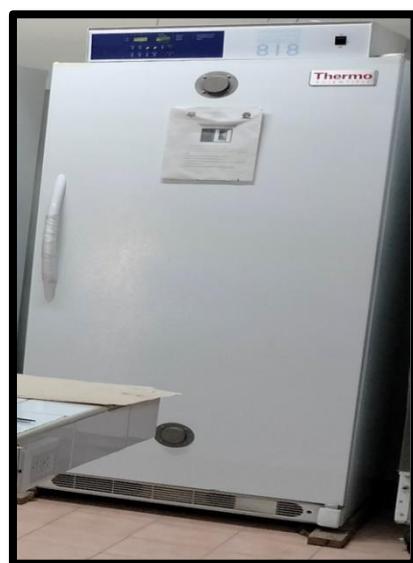


Figura 14. Cámara de crecimiento para plantas [LAB- LINE INSTRUMENTS, INC, MODEL N° 464RH].

La germinación es el proceso que despierta la semilla, activando su metabolismo para que pueda brotar y convertirse en una plántula. Durante este proceso, el embrión dentro de la semilla comienza a desarrollarse, formando las estructuras clave que darán lugar a una planta completa. Todo esto sucede cuando las condiciones del entorno, como la humedad y la temperatura, son adecuadas para su crecimiento (Gatica-Vásquez *et al.*, 1995).



Figura 15. Cajas Petri en la cámara de crecimiento para el proceso de imbibición.

Una vez que finalizó la etapa de imbibición, se procedió a pesar las semillas por tratamiento embebidas.



Figura 16. Semillas de girasol después de la etapa de imbibición.

Posteriormente se llevó a cabo la siembra, en esta fase esencial, las semillas se colocaron con sumo cuidado sobre papel Anchor, un material especializado suministrado por Seedburo Equipment Company para mantener las condiciones óptimas de humedad y aireación, fundamentales para el desarrollo inicial de las semillas.

El empleo del papel Anchor no solo garantiza una distribución uniforme de la humedad, sino que también facilita la observación y el monitoreo del crecimiento de las semillas durante la germinación. Cada semilla fue posicionada con el embrión hacia abajo, asegurando un espaciamiento adecuado para evitar la competencia por recursos.

El papel Anchor fue cubierto con otra capa de papel humedecido teniendo las debidas precauciones de no mover las semillas ya colocadas, en seguida se etiquetó con información de los tratamientos aplicados y fecha de siembra. Se elaboraron tres replicas con 25 semillas cada una y una distancia aproximada de 1cm de separación (García-López *et al.*, 2016).



Figura 17. Papel Anchor humedecido.

Se comenzó a enrollar la tira de papel Anchor suavemente desde un extremo hacia el otro, el enrollamiento debía ser firme, pero no excesivamente apretado, para asegurar una adecuada circulación de aire y permitir la expansión de las semillas. Se aseguró de que las semillas quedaran bien distribuidas a lo largo del rollo y que no se desplazaran durante el proceso. Una vez que la tira de papel Anchor con las semillas estuvo completamente enrollada, se colocó el rollo verticalmente dentro de una bandeja de germinación. Los rollos quedaron bien ajustados para evitar que se desenrollaran, pero con suficiente espacio para mantener una buena aireación.



Figura 18. Cestas de plástico con los rollos formados de papel anchor.

Los rollos fueron colocados cuidadosamente en bolsas de polietileno transparentes y luego ubicados en cestas de plástico. Posteriormente, fueron trasladados a una cámara de crecimiento controlada. En esta cámara, los rollos se mantuvieron durante un periodo de 7 días, bajo un régimen de luz y oscuridad que consistía en 16 horas de luz seguidas por 8 horas de oscuridad. La temperatura dentro de la cámara se mantuvo constante en 25 °C, asegurando así condiciones óptimas para el crecimiento.

Al séptimo día, se realizó el primer conteo de las plántulas. Durante este proceso, las plántulas se clasificaron en dos grupos: plántulas normales, que eran aquellas con todas sus partes bien desarrolladas, y plántulas anormales, que presentaban alguna malformación en sus órganos.

La germinación incluye todos los eventos desde la absorción inicial de agua hasta la salida de la radícula a través de las capas de la semilla (*Carrera-Castaño et al., 2020*).

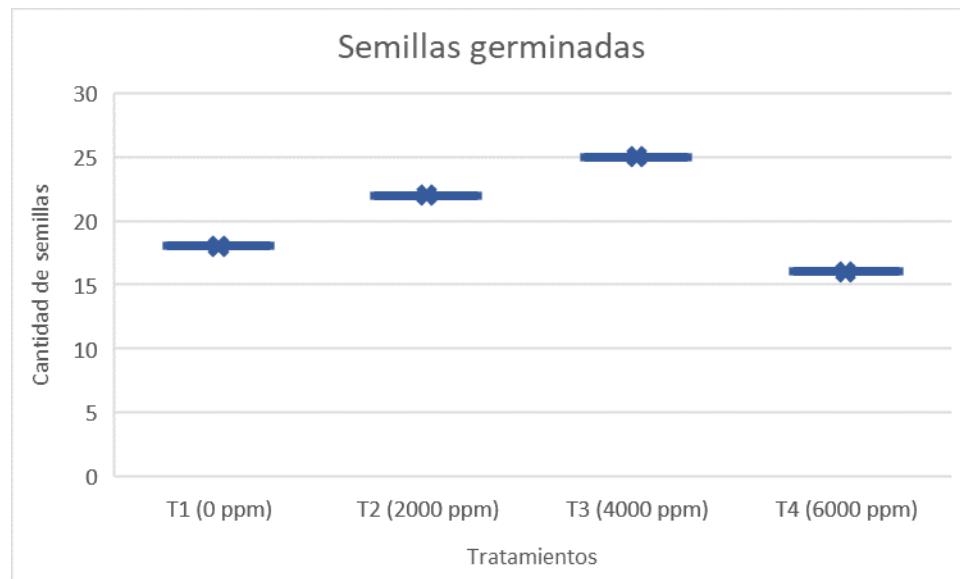


Figura 19. Semillas germinadas en el experimento de las diferentes dosis de tratamiento

Medición de la longitud de la radícula

Para llevar a cabo la medición de la longitud de la radícula, se seleccionaron plántulas de manera aleatoria de los distintos tratamientos aplicados. Las plántulas fueron extraídas cuidadosamente de los rollos de germinación para evitar cualquier daño. Cada radícula seleccionada fue colocada sobre papel milimetrado, lo que facilitó una medición precisa. La longitud de cada radícula se midió utilizando un vernier, registrándose las medidas en milímetros para asegurar la mayor precisión posible.

Porcentaje de Vigor

El vigor que desarrollan las semillas comprende la viabilidad, la latencia de las semillas, la pronta germinación, el posterior desarrollo de las plántulas y la resistencia al envejecimiento, ya que una vez que llegan a esta etapa la vitalidad se ve disminuida, lo cual se hacen más susceptibles al estrés durante la etapa de germinación (Reed *et al.*, 2022, Gatica-Vásquez *et al.*, 1995).

Segunda fase del experimento

A los 14 días del experimento, 25 plantas restantes de cada tratamiento se trasplantaron en suelo en invernadero con las siguientes medidas: 3 m de ancho, 4 m largo y 2.5m de altura.



Figura 20. Invernadero medidas utilizado para el trasplante en suelo.

Haciendo una medición de plúmula y conteo de hojas. Se mantuvo el conteo durante 100 días.



Figura 21. Planta en invernadero.

La inflorescencia del girasol comprende un grupo de flores que incluyen un capítulo. Para alcanzar la etapa de floración, el cultivo requiere casi 70 días desde el día de la siembra, en promedio se requieren 130 días para la maduración de las semillas y 10 días después de la etapa de maduración, se cosechan las semillas (Roy *et al.*, 2024).

Posteriormente se realizó la cosecha de las plantas con los tres diferentes tratamientos de nanopartículas de hidroxiapatita, cortando la planta a nivel del suelo, identificando los diferentes tratamientos. Se realizó la trituración de las plantas a través de un molino para obtener como resultado silo de girasol.



Figura 22. Elaboración del silo de Girasol.



Figura 23. Selección de la muestra del silo de Girasol.

Mezclando bien las muestras para obtener una muestra homogénea que refleje el contenido general del silo, una vez se recolectó la muestra se envió al laboratorio Rock River Laboratory INC. Agricultural Analysis ubicado en Torreón, Coahuila, México para proceder con los análisis de composición química y nutricional.

Se evaluaron análisis químicos y físicos para determinar los componentes nutricionales del silo de girasol y evaluar su calidad como:

- Análisis de Humedad
- pH
- Contenido de Materia Seca (MS)
- Análisis de Fibra
- Contenido de Proteína Cruda (PC)
- Contenido de Lípidos
- Análisis Microbiológicos

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La germinación de las semillas inicia cuando estas absorben agua (El-Maarouf-Bouteau, 2022). La etapa de la imbibición se desarrolla por el paso de agua que se da como resultado de la impulsión que se libera por la entrada de agua que da como efecto la activación consecuente de los principales sistemas metabólicos después de aventajar los umbrales de hidratación específicos (Obroucheva, 2021).

Cuadro 1. Resultados de la etapa de imbibición de las semillas de girasol.

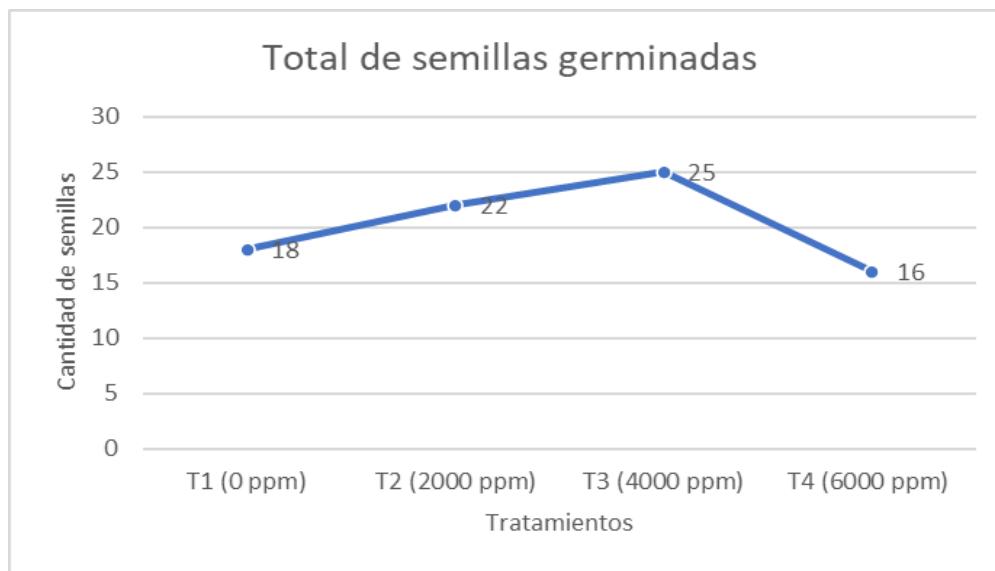
Dosis	Peso (g) 25 semillas al inicio del experimento	Peso (g) 25 semillas después de la etapa de imbibición	(g) que aumentó en el proceso de imbibición
T1 (0 ppm)	2.2	6	3.8
T2 (2000 ppm)	2.6	6.2	3.6
T3 (4000 ppm)	2.5	6.5	4
T4 (6000 ppm)	2.2	5.8	3.6

Germinación de semillas

De los resultados obtenidos referentes a la germinación, se encontró que las Nanopartículas de hidroxiapatita promovieron la germinación de las semillas tratadas en el T2 (2000 ppm) en un 88%, las que se trajeron con el T3 (4000 ppm) en un 100%, las tratadas en el T4 (6000 ppm) en un 64% y para el tratamiento testigo se obtuvo un 72% de germinación. El tratamiento 4 (6000 ppm), no solo no se comportó igual que el tratamiento testigo, si no que, además, la cantidad de semillas germinadas fue menor.

Cuadro 2. Total de semillas germinadas.

Tratamiento	Semillas incubadas	Plántulas normales	V %
T1 (0 ppm)	25	18	72
T2 (2000 ppm)	25	22	88
T3 (4000 ppm)	25	25	100
T4 (6000 ppm)	25	16	64

**Figura 24.** Total de semillas germinadas.

Vigor de semillas

Este rango se evaluó al cuarto día, esta característica es importante para evaluar la velocidad de la germinación, la longevidad de las semillas, así como el crecimiento de las plántulas, este rasgo, determinará el éxito en el desarrollo de la planta (Reed *et al.*, 2022). Se tomaron en cuenta las plántulas con desarrollo de la plúmula y la raíz en un tamaño de 2 cm y se utilizó la siguiente fórmula para determinarlo (Flores-Hernández *et al.*, 2021) .

$$Vigor\ de\ semilla\ (V\%) = \frac{\text{plántulas normales}}{\text{número de semillas incubadas}} \times 100$$

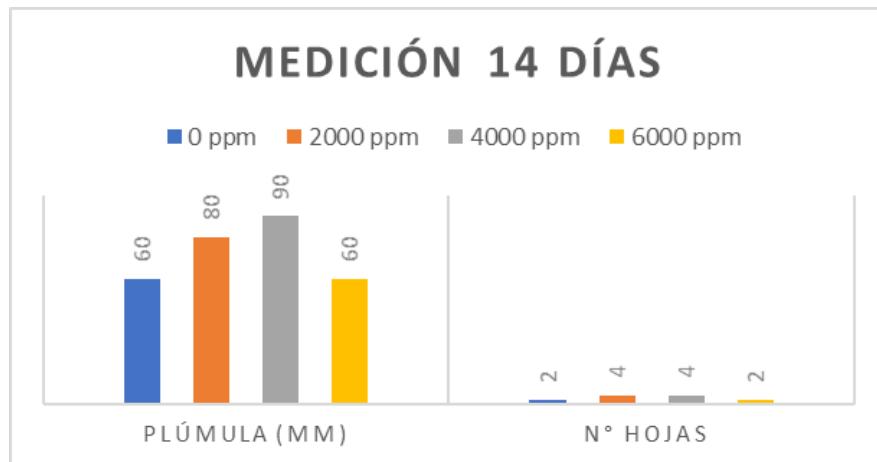


Figura 25. Vigor de las semillas evaluadas.

Longitud de plúmula

La plúmula es un sistema de brotes capaces de absorber sustancias como agua, energía luminosa y sustancias inorgánicas con la finalidad de establecer un saludable crecimiento (Puttha *et al.*, 2023). Para la medición de la plúmula se utilizó una regla tipo Vernier para tomar los valores con mayor precisión, midiéndose desde la intersección de la raíz hasta la base del cotiledón (Flores-Hernández *et al.*, 2021). Se realizaron tres mediciones, a los 14, 28 y 35 días.

Cuadro 3. Medición a los 14 días de la plúmula.

Tratamiento	Plúmula (mm)	Número de hojas
0 ppm	60	2
2000 ppm	80	4
4000 ppm	90	4
6000 ppm	60	2



Figura 26. Plántula de girasol tratamiento 0 ppm con una longitud de 60 mm a los 14 días.



Figura 27. Plántula de girasol tratamiento 2000 ppm con una longitud de 80 mm a los 14 días.



Figura 28. Plántula de girasol tratamiento 4000 ppm con una longitud de 90 mm a los 14 días.



Figura 29. Plántula de girasol tratamiento 6000 ppm con una longitud de 60 mm a los 14 días.

En el tratamiento de 6000 ppm se puede observar una plúmula con un grosor mayor a las diferentes dosis de tratamientos aplicados.

Cuadro 4. Longitud de plúmula a los 28 días.

Tratamiento	Plúmula (cm)
0 ppm	15
2000 ppm	28
4000 ppm	25
6000 ppm	20

Cuadro 5. Longitud de plúmula a los 35 días.

Tratamiento	Centímetros (cm)
0 ppm	28
2000 ppm	45
4000 ppm	39
6000 ppm	36

Cuadro 6. Variables agronómicas del cultivo de girasol a los 100 días.

Variables agronómicas del cultivo de girasol			
Dosis	Longitud (m)	Diámetro del tallo (cm)	Diámetro del capítulo
T2 (2000 ppm)	± 1.16	± 2.7	± 16.3
T3 (4000 ppm)	± 2.48	± 3.1	± 20.5
T4 (6000 ppm)	± 1.89	± 2.3	± 18.1

En el trabajo de investigación los resultados nos muestran que las nHAp, como imbibidora de las semillas de girasol en diferentes tratamientos influenciaron en la respuesta de germinación y posterior desarrollo de las plántulas, es de suma importancia mencionar que las nHAp solo se aplicaron una vez en la etapa de

imbibición. El trabajo se centró primordialmente en la germinación y crecimiento en el que se obtuvieron datos variables, sería de utilidad realizarlo con un mayor número de semillas y evaluar su desarrollo a nivel químico para interacciones con los componentes del suelo, transferencia del perfil del suelo y respuesta de la planta.

En este estudio, se investigó el impacto de las nanopartículas de hidroxiapatita (nHAp) en la etapa de imbibición de las semillas de girasol, observando una mejora en la tasa de absorción de agua en comparación con las semillas control. Estos resultados coinciden con los obtenidos por (Flores-Hernández *et al.*, 2021) quienes reportaron que las nanopartículas de hidroxiapatita mejoran la imbibición en semillas de rábano lo que no afecta el vigor y la germinación, pero dosis de 500 y 1 000 mg L⁻¹ generan un efecto inhibitorio de esta y otras variables.

Mahhsoodi *et al.*, 2020 concuerda que el uso de nHAp puede proporcionar la liberación lenta de elementos químicos a la planta durante varias etapas del crecimiento y así aumentar el rendimiento.

Los resultados obtenidos en este estudio sobre el uso de nanopartículas de hidroxiapatita (HANP) en la germinación y crecimiento de cultivos coinciden en varios aspectos con los hallazgos de (Pradhan *et al.*, 2021) quienes evaluaron el impacto de nHAp cargadas con urea (Ur@HANP) en el transporte de nutrientes y la germinación de semillas de arroz. Ambos estudios reportan una mejora significativa en la germinación y el crecimiento de las plantas, lo que indica que las nHAp, con o sin carga de nutrientes, pueden desempeñar un papel crucial en la mejora de la agricultura. Además, mientras que los resultados de (Pradhan *et al.*, 2021) sugieren que el Ur@HANP es una alternativa adecuada para la agricultura sostenible, nuestros hallazgos indican que las nanopartículas de hidroxiapatita sin carga de fertilizantes también pueden mejorar la eficiencia de los fertilizantes aplicados convencionalmente, reduciendo el impacto ambiental.

(Khan *et al.*, 2023c, Fatima *et al.*, 2023) suponen que los efectos similares de las nanopartículas están asociados con una absorción más rápida de agua por parte de las semillas, mayores actividades de α-amilasa, mayores contenidos de

azúcar soluble y regulación del nivel de expresión relativa de los genes responsables de la relación ABA/GA, las enzimas antioxidantes y la homeostasis iónica. Sin embargo, aún quedan por explorar más mecanismos moleculares. Aunque las nanopartículas tienen el potencial de mejorar la tolerancia al estrés de las plantas, la seguridad ambiental y el posible alto costo obstaculizan la adopción generalizada de la nanotecnología en la agricultura.

La similitud en los resultados obtenidos del experimento de girasol se asemejan a los resultados obtenidos de (Acharya et al., 2020) el cual se observó mayor rendimiento en sandías tratadas con AgNP, podría reflejar un mecanismo generalizado en el que las nanopartículas actúan como un factor que favorece la absorción de agua o la activación de enzimas clave en el proceso de germinación, tal como se ha documentado con nanopartículas de plata (AgNP). Es posible que las nanopartículas de hidroxiapatita, con sus propiedades bioactivas y su capacidad para liberar iones de calcio, puedan jugar un papel similar, estimulando el crecimiento inicial de las semillas de girasol.

Cuadro 7. Componentes de nutrientes de las muestras de Girasol % MS.

Muestra	Calcio (Ca)	Fósforo (P)	Magnesio (Mg)	Potasio (K)	Azufre (S)	Cenizas
2000 ppm	1.05	0.25	0.36	1.68	0.18	19.54
4000 ppm	1.15	0.31	0.34	2.11	0.23	15.52
6000 ppm	1.26	0.26	0.36	2.03	0.21	16.80

Cuadro 8. Análisis de humedad y MS.

Muestra	Humedad	MS
2000 ppm	67.62	32.38
4000 ppm	85.06	14.94
6000 ppm	75.47	24.23

Cuadro 9. Resultados de pH.

Muestra	pH

2000 ppm	32.38
4000 ppm	14.94
6000 ppm	24.23

Los resultados de los análisis de laboratorio revelaron que el contenido de proteína cruda fue significativamente mayor en el (T3) 4000 ppm nHAp, con un promedio de 18.44, en comparación con los diferentes tratamientos. Sin embargo, la proteína soluble favoreció en el (T2) 2000 ppm con 59.64 %.

Cuadro 10. Composición química de las muestras de girasol de los diferentes tratamientos.

Muestras	Proteína cruda %MS	Proteína Soluble %	Almidones	FDA	aFDN	aFDNm
2000 ppm	13.45	59.64	5.36	47.58	55.80	49.52
4000 ppm	18.44	40.73	0.79	45.54	52.27	46.07
6000 ppm	16.27	49.67	5.88	44.01	50.31	44.80

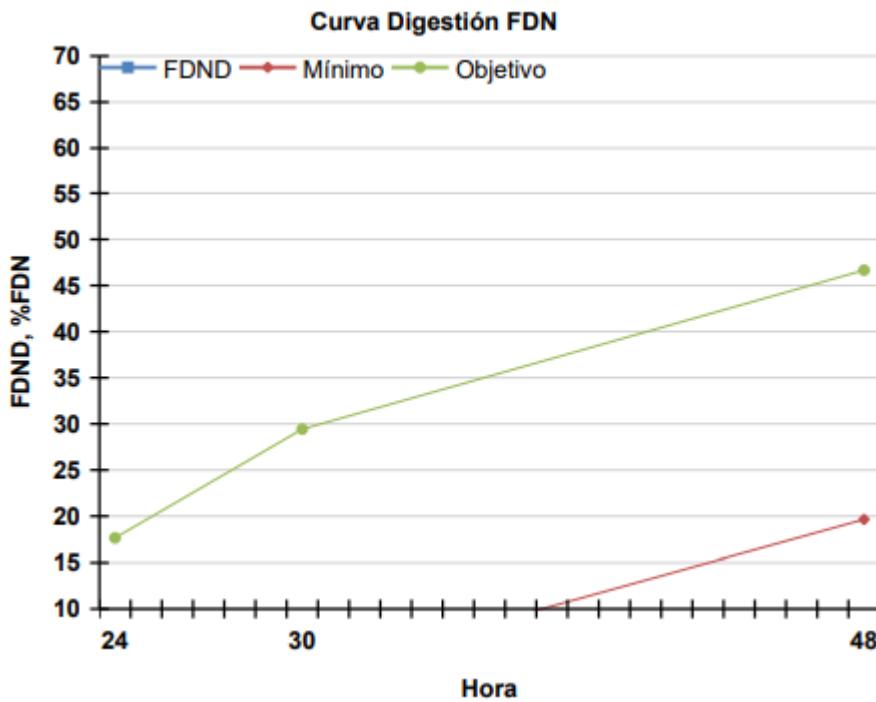
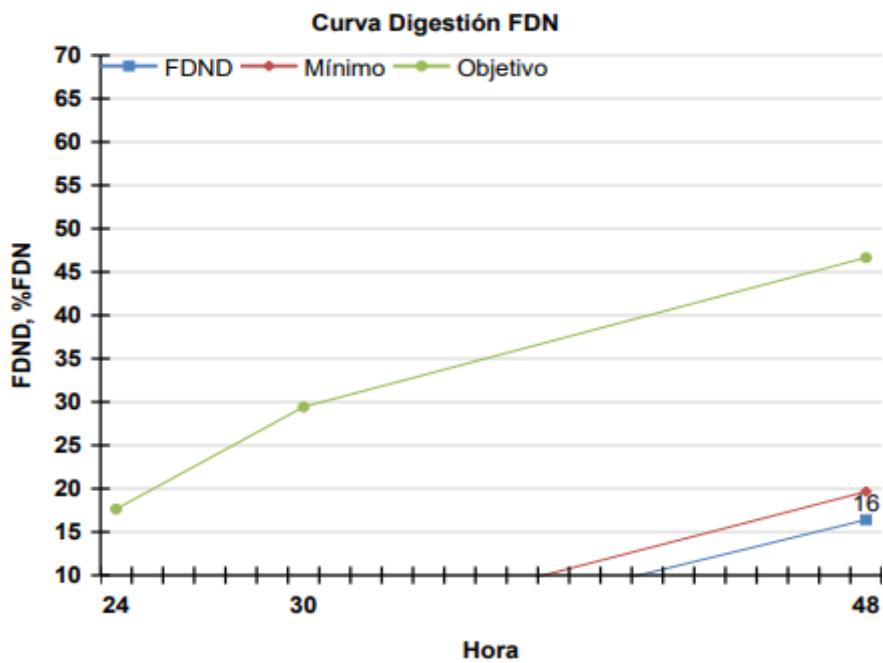
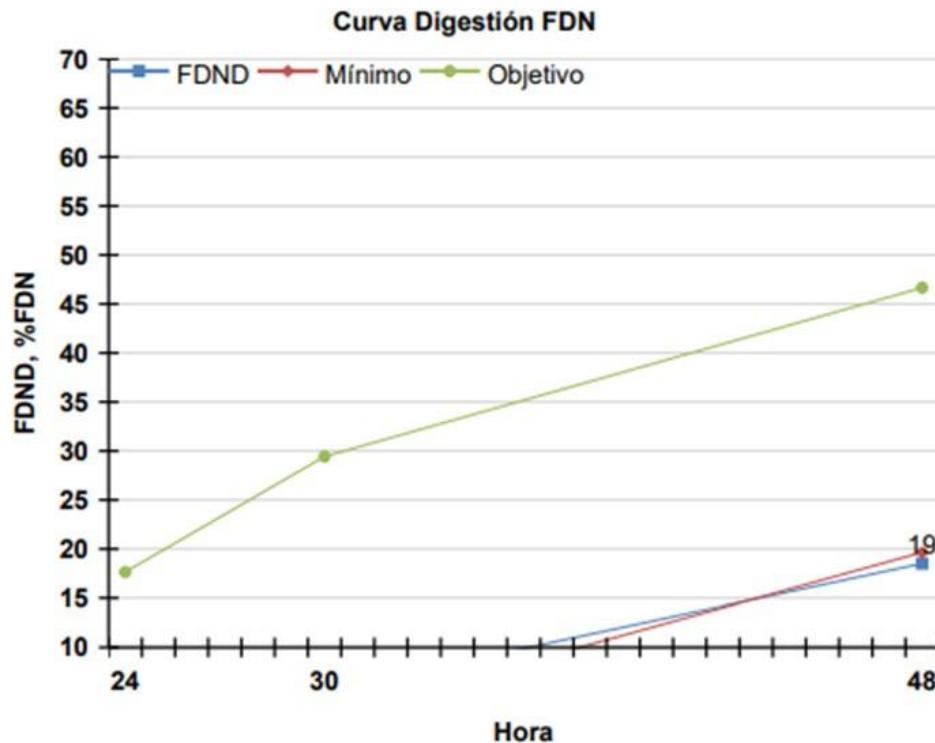


Figura 30. Curva de digestión de la muestra 2000 ppm



Cuadro 31. Curva de digestión de la muestra 4000 ppm.



Cuadro 32. Curva de digestión de la muestra 6000 ppm.

La curva de digestión del silo de girasol nos indica que las muestras del (T2) 2000 ppm y (T3) 4000 ppm nAHp están por debajo del objetivo, mientras que el (T4) 6000 ppm se encuentra al límite del objetivo un 19 % de digestión a las 48 horas. A partir de este punto, se considera que no cumple con los requisitos propiamente de un forraje sin embargo es ideal como suplemento alimenticio.

V. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos, se determina que la hidroxiapatita influye en la germinación del cultivo de girasol (*Helianthus annus*), sin embargo, existen diferencias en los tratamientos aplicados, según la dosis utilizada, mientras que en el tratamiento de 6000 ppm se obtuvieron bajos niveles de germinación, se observó un desarrollo de la plúmula con una mayor circunferencia en la etapa de germinación. El tratamiento de 4000 ppm fue el más favorecido, presentando un porcentaje del 100 % de germinación de las semillas imbibidas. Según las observaciones generadas en el presente estudio, viéndose favorecida la germinación, se abre una puerta a desarrollar dicho experimento en diferentes cultivos y variedades de semillas, para conocer si las Nanopartículas de hidroxiapatita se comportan de la misma manera beneficiando a otras semillas.

Los análisis de laboratorio realizados durante el estudio fueron fundamentales para evaluar el impacto de los tratamientos de nanopartículas de hidroxiapatita utilizadas en la etapa de imbibición de la germinación en el cultivo de Girasol, proporcionando datos clave que permitieron comprender las interacciones entre los factores nutricionales y el rendimiento de la planta. A demás de las nHAp como imbibidora se debe considerar llevar a cabo una fertilización en el proceso de crecimiento del cultivo para obtener resultados favorables.

VI. REFERENCIAS

- ACHARYA, P., JAYAPRAKASHA, G. K., CROSBY, K. M., JIFON, J. L. & PATIL, B. S. 2020. Nanoparticle-Mediated Seed Priming Improves Germination, Growth, Yield, and Quality of Watermelons (*Citrullus lanatus*) at multi-locations in Texas. *Scientific Reports*, 10, 5037.
- ADELEKE, B. S., BABALOLA, O. O. J. F. S. & NUTRITION 2020. Oilseed crop sunflower (*Helianthus annuus*) as a source of food: Nutritional and health benefits. 8, 4666-4684.
- AKHTAR, K. & PERVEZ, C. 2021. Evaluation of the experimental parameters for the morphological tuning of monodispersed calcium hydroxyapatite. *Journal of Dispersion Science & Technology*, 42, 984-997.
- ALBIS ARRIETA, A. R., GONZALEZ ORTIZ, F. A. & TORRENEGRA ESCORCIA, D. 2021. Biosíntesis de nanopartículas de plata con Chlorella sp. *Revista ION*, 34, 7-15.
- AMIRUL, R. J. J. O. N. & MEDICINE, H. 2020. Literature Review: Study of Antibacterial Activity of Sunflower (*Helianthus Annuus L.*) Extract and Its Phytochemical Profiles. 3, 29-37.
- ARSHAD, A., GHANI, M. U., HASSAN, M. U., QAMAR, H. & ZUBAIR, M. J. S. M. 2020. Sunflower modelling: a review. 307-326.
- BALDWIN, B. G., FAWCETT, S. & WOLKIS, D. 2024. Embryo excision in Compositae, with implications for combating biodiversity loss. *Applications in Plant Sciences*, 12.
- BALUSAMY, S. R., JOSHI, A. S., PERUMALSAMY, H., MIJAKOVIC, I. & SINGH, P. 2023. Advancing sustainable agriculture: a critical review of smart and eco-friendly nanomaterial applications. *Journal of Nanobiotechnology*, 21.
- BANOTRA, M., KUMAR, A., SHARMA, B., NANDAN, B., VERMA, A., KUMAR, R., GUPTA, V. & BHAGAT, S. 2017. Prospectus of use of Nanotechnology in Agriculture—A Review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6, 1541-1551.
- BASHIR, T., ZIA-UR-REHMAN MASHWANI, K. Z., HAIDER, S., SHAISTA TABASSUM, M. J. P. & BIOLOGY, A. 2021. 02. Chemistry, pharmacology and ethnomedicinal uses of *Helianthus annuus* (Sunflower): A Review. 4, 226-235.
- BENATAYA, K., LAKRAT, M., HAMMANI, O., ADDOUZ, M., AIT YASSINE, Y., ABUELIZZ, H. A., ZARROUK, A., KARROUCHI, K. & MEJDOUNBI, E. 2024. Synthesis of High-Purity Hydroxyapatite and Phosphoric Acid Derived from Moroccan Natural Phosphate Rocks by Minimizing Cation Content Using Dissolution–Precipitation Technique. *Molecules*, 29, 3854.
- BHATLA, S. C., GOGNA, M., JAIN, P., SINGH, N., MUKHERJEE, S., KALRA, G. J. P. S. & BEHAVIOR 2021. Signaling mechanisms and biochemical pathways regulating pollen-stigma interaction, seed development and seedling growth in sunflower under salt stress. 16, 1958129.

- BORGO, J., WAGNER, M. S., LAURELLA, L. C., ELSO, O. G., SELENER, M. G., CLAVIN, M., BACH, H., CATALÁN, C. A. N., BIVONA, A. E., SEPÚLVEDA, C. S. & SÜLSEN, V. P. 2024. Plant Extracts and Phytochemicals from the Asteraceae Family with Antiviral Properties. *Molecules*, 29, 814.
- CARRERA-CASTAÑO, G., CALLEJA-CABRERA, J., PERNAS, M., GÓMEZ, L. & OÑATE-SÁNCHEZ, L. 2020. An Updated Overview on the Regulation of Seed Germination. *Plants* [Online], 9.
- CEYLAN, Y., ALTUNOGLU, Y. C. & HORUZ, E. 2023. HSF and HspGene Families in sunflower: a comprehensive genome-wide determination survey and expression patterns under abiotic stress conditions. *Protoplasma*, 260, 1473-1491.
- CHÁVEZ-GARCÍA, J. A., ANDRADE-RODRÍGUEZ, M., BELLO-BELLO, J. J., RUEDA-BARRIENTOS, M. C., GUILLÉN-SÁNCHEZ, D. & SAINZ-AISPURO, M. D. J. 2020. Nanopartículas de plata en el establecimiento in vitro de ápices de gladiolo. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 43, 557-564.
- CRUZ-LOPES, L., MACENA, M. & GUINÉ, R. P. F. 2021. Application of nanotechnologies along the food supply chain. *Open Agriculture*, 6, 749-760.
- DA SILVA, W. V., DA S. TAVEIRA, J. H., FERNANDES, P. B., SILVA, P. C., DA COSTA, A. B. G., COSTA, C. M., GIONGO, P. R., CORIOLETTI, N. S. D. & GURGEL, A. L. C. 2023. Organic and mineral fertilization determining the agronomic performance of sunflower cultivars and soil chemical attributes. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental - Agriambi*, 27, 927-933.
- DAYAL, D., PATEL, N. S. & KHOJA, J. R. 2021. Nanofertilizers for Enhancing Nutrient use Efficiency and Crop Productivity in Vegetable Crops of Gujarat. *Quarterly Research Journal of Plant & Animal Sciences / Bhartiya Krishi Anusandhan Patrika*, 36, 260-263.
- DEY, A. & NANDY, P. 2024. Size, shape, and dose — three crucial determinants for applying nanoparticles in sustainable plant biology. *Academia Biology*, 2.
- EDNA, X. F.-R., DIEGO, V. B.-M., JAVIER, M.-J., LUZ, A. D. H.-D. L. & MARÍA, J. R.-Á. 2023. Hidroxiapatita: Un biomaterial fuera de serie. *RD-ICUAP*, 9.
- EL-MAAROUF-BOUTEAU, H. 2022. The Seed and the Metabolism Regulation. *Biology* [Online], 11.
- ESTRADA-ARELLANO, K. L., VÁZQUEZ-VÁZQUEZ, C., BETANCOURT-GALINDO, R., MUÑIZ-RANGEL, M. D., VALENZUELA-NÚÑEZ, L. M., GARCÍA-HERNÁNDEZ, J. L. & GALLEGOS-ROBLES, M. Á. 2023. Foliar fertilization with ZnO nanoparticles and its effect on production, biophysical and nutraceutical quality of pecan nuts (*Carya illinoiensis*). *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 41.
- FATIMA, A., SAFDAR, N., AIN, N.-U., YASMIN, A. & CHAUDHRY, G.-E.-S. 2023. Abscisic Acid-Loaded ZnO Nanoparticles as Drought Tolerance Inducers in Zea maysL. with Physiological and Biochemical Attributes. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42, 7280-7293.

- FELLET, G., PILOTTO, L., MARCHIOL, L. & BRAIDOT, E. 2021. Tools for Nano-Enabled Agriculture: Fertilizers Based on Calcium Phosphate, Silicon, and Chitosan Nanostructures. *Agronomy-Basel*, 11, 25.
- FLORES-HERNÁNDEZ, E. A., LIRA-SALDIVAR, R. H., RUIZ-TORRES, N. A., GARCÍA-LÓPEZ, J. I., MORENO-RESÉNDEZ, A., RODRÍGUEZ-DIMAS, N., PRECIADO-RANGEL, P. & MENDOZA-RETANA, S. S. 2021. Síntesis de nanopartículas de hidroxiapatita y su efecto en plántulas de Raphanus sativus. *Ecosistemas Y Recursos Agropecuarios*, 8, 12.
- GARCÍA-LÓPEZ, J. I., RUIZ-TORRES, N. A., LIRA-SALDIVAR, R. H., VERA-REYES, I. & MÉNDEZ-ARGÜELLO, B. 2016. Técnicas para evaluar germinación, vigor y calidad fisiológica de semillas sometidas a dosis de nanopartículas. *Centro de Investigación en química Aplicada (CIBQ)*.
- GATICIA-VÁSQUEZ, M., MOLINA-MORENO, J. C., CARBALLO-CARBALLO, A. & GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ, V. A. J. R. F. M. 1995. TASA RESPIRATORIA Y VIGOR DE SEMILLAS EN GIRASOL. 18, 25-25.
- GUO, S., KLINKESORN, U., LORJAROENPHON, Y., GE, Y. & NA JOM, K. 2021. Effects of germinating temperature and time on metabolite profiles of sunflower (*Helianthus annuus* L.) seed. *Food Science & Nutrition*, 9, 2810-2822.
- HU, Y., SONG, J., FENG, A., LI, J., LI, M., SHI, Y., SUN, W. & LI, L. 2023. Recent Advances in Nanotechnology-Based Targeted Delivery Systems of Active Constituents in Natural Medicines for Cancer Treatment. *Molecules*, 28, 7767.
- ILMUDEEN, S., SANMUGAM, M., KANCHANA, D. & FAHID, F. 2022. Advances of Nanofertilizers in Modern Agriculture; A review. 19-29.
- INEGI. 2020. *Clima en el municipio de Torreón Coahuila, México*. [Online]. Available: <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/coah/territorio/default.aspx?tema=me&e=05> [Accessed].
- INEGI. 2023. *Ubicación del municipio de Torreón Coahuila, México* [Online]. Available: https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/esp_anol/bvinegi/productos/geografia/imagen_cartografica/map_top_municipal/794551122587_geo.pdf [Accessed].
- ISHIKAWA, K., GARSKAITE, E. & KAREIVA, A. 2020. Sol-gel synthesis of calcium phosphate-based biomaterials-A review of environmentally benign, simple, and effective synthesis routes. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 94, 551-572.
- JUE, C., ZHIMIN, Y., XIAOLI, P. & RUI, L. 2024. Efectos de los disolventes eutécticos profundos naturales sobre la germinación de semillas de plantas y las propiedades antioxidantes de las plántulas. *Asian Journals of Ecotoxicology*, 19, 416-428.
- K.S.SUBRAMANIAN, GUNASEKARAN, K., NATARAJAN, N., CHINNAMUTHU, C. R., LAKSHMANAN, A. & RAJKISHORE, S. K. 2020. *Nanotechnology in Agriculture*, New Delhi, NIPA.

- KHAN, M. N., FU, C., LI, J., LI, Y., KHAN, Z., ZHU, L. & WU, H. 2023a. 6 - Plant nanobionics: nanotechnology for augmentation of photosynthesis efficiency. In: ZHANG, P., LYNCH, I., WHITE, J. C. & HANDY, R. D. (eds.) *Nano-Enabled Sustainable and Precision Agriculture*. Academic Press.
- KHAN, M. N., FU, C., LI, J., TAO, Y., LI, Y., HU, J., CHEN, L., KHAN, Z., WU, H. & LI, Z. 2023b. Seed nanopriming: How do nanomaterials improve seed tolerance to salinity and drought? *Chemosphere*, 310, 136911.
- KHAN, M. N., FU, C., LI, J., TAO, Y., LI, Y., HU, J., CHEN, L., KHAN, Z., WU, H. & LI, Z. J. C. 2023c. Seed nanopriming: How do nanomaterials improve seed tolerance to salinity and drought? 310, 136911.
- KIM, E.-S. 2024. Directed Evolution: A Historical Exploration into an Evolutionary Experimental System of Nanobiotechnology, 1965–2006. *Minerva*, 1-22.
- LEE, Y.-I. & YEUNG, E. C. 2023. The orchid seed coat: a developmental and functional perspective. *Botanical Studies*, 64.
- LI, W., ZHANG, H., ZENG, Y., XIANG, L., LEI, Z., HUANG, Q., LI, T., SHEN, F. & CHENG, Q. 2020. A Salt Tolerance Evaluation Method for Sunflower (*Helianthus annuus*L.) at the Seed Germination Stage. *Scientific Reports*, 10.
- LIRA-SALDIVAR, R. H., ARGÜELLO, B. M., VILLARREAL, G. D. L. S. & REYES, I. V. 2018. Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta Universitaria*, 28, 9-24.
- LOZANO, F. J. R. 2024. Proceso de investigación, producción y publicación del reportaje “Agrodesplazados: el costo de la cuenca lechera en La Laguna”. *Sistema de Universidad Virtual, Universidad de Guadalajara*. .
- MAHALIK, G. J. I. J. O. N. S. 2022. Review on the Health Benefits of *Helianthus annuus* L. 41140-41142.
- MAHAMBA, C. & PALAMULENI, L. G. 2024. Sunflower (*Helianthus annuus*) seeds as a natural coagulant for water turbidity treatment: assessment of efficacy and dosage. *Applied Water Science*, 14, 1-10.
- MAHAPATRA, A., GOUDA, B., PATEL, D., BEHERA, M. P. J. C. S. R. & LETTERS 2020. Integrated Nutrient Management in Sunflower (*Helianthus annuus* L.)—A Review. 9, 862-868.
- MATUSZEWSKI, A., LUKASIEWICZ, M., NIEMIEC, J., KAMASZEWSKI, M., JAWORSKI, S., DOMINO, M., JASINSKI, T., CHWALIBOG, A. & SAWOSZ, E. 2021. Calcium Carbonate Nanoparticles-Toxicity and Effect of In Ovo Inoculation on Chicken Embryo Development, Broiler Performance and Bone Status. *Animals*, 11, 22.
- MATYSIAK, K. 2024. Regulatory wzrostu i rozwoju w uprawie słonecznika zwyczajnego (*Helianthus annuus* L.). *Progress in Plant Protection*, 64, 63-69.
- MEJÍA, D. A. & REYES, A. N. 2020. Exploración para la producción de forraje verde hidropónico de maíz y sorgo para la alimentación de ganado lechero: Revisión de Literatura.
- NAFISA, M., AFSHIN JAFAR, P. & SAMRAM MANSOORI, V. 2020. Investigar el efecto del tipo de materia prima, temperatura y método de

- procesamiento de las semillas de girasol sobre las características químicas, sensoriales y de vida útil de las semillas de girasol envasadas. *Journal of Food Science & Technology* (2008-8787), 17, 1-12.
- NAWAZ, T., GU, L., FAHAD, S., SAUD, S., BLEAKLEY, B. & ZHOU, R. 2024. Exploring Sustainable Agriculture with Nitrogen-Fixing Cyanobacteria and Nanotechnology. *Molecules*, 29, 2534.
- OBROUCHEVA, N. J. R. J. O. P. P. 2021. Germination program in non-dormant seeds: Programming, saving and implementation. 68, 1003-1017.
- OROPEZA TOSCA, D. R., BARRAS BAPTISTA, A., CASTILLO ROMERO, F., GUERRA QUE, Z. & DE LEÓN DE LOS SANTOS, B. R. 2023. Análisis del estado del arte de la agricultura de precisión para su aplicación en México. *REVISTA IPSUMTEC*, 6, 106-113.
- PASTELÍN-SOLANO, M. C., RAMÍREZ-MOSQUEDA, M. A., BOGDANCHIKOVA, N., CASTRO-GONZÁLEZ, C. G. & BELLO-BELLO, J. J. 2020. Silver nanoparticles affect the micropropagation of vanilla (*vanilla planifolia* jacks. Ex andrews). *Agrociencia*.
- PAZ-TREJO, C., FLORES-MÁRQUEZ, A. R. & GÓMEZ-ARROYO, S. 2023. Nanotechnology in agriculture: a review of genotoxic studies of nanopesticides in animal cells. *Environmental Science & Pollution Research*, 30, 66473-66485.
- PEDRINI, S., BALESTRAZZI, A., MADSEN, M. D., BHALSING, K., HARDEGREE, S. P., DIXON, K. W. & KILDISHEVA, O. A. 2020. Seed enhancement: getting seeds restoration-ready. *Restoration Ecology*, 28, S266-S275.
- POPOV, M., PRVULoviĆ ŠUĆUR, J., VIDOViĆ, S., SAMARDžIĆ, N., STOJANoviĆ, T. & KONSTANTINOViĆ, B. 2021. Chemical characterization of common milkweed (*asclepias syriaca* l.) root extracts and their influence on maize (*zea mays* l.), soybean (*glycine max* (l) merr.) and sunflower (*helianthus annuus* l.) seed germination and seedling growth. *Applied ecology and environmental research*, 19, 4219-4230.
- PURAİKALAN, Y. & SCOTT, M. 2023. Sunflower Seeds (*Helianthus Annuus*) and Health Benefits: A Review. *Recent Progress in Nutrition*, 03, 010.
- PUTTHA, R., VENKATACHALAM, K., HANPAKDEESAKUL, S., WONGSA, J., PARAMETTHANUWAT, T., SREAN, P., PAKEECHAI, K. & CHAROENPHUN, N. J. H. 2023. Exploring the potential of sunflowers: agronomy, applications, and opportunities within bio-circular-green economy. 9, 1079.
- QIU, C., ZHANG, J. Z., WU, B., XU, C. C., PANG, H. H., TU, Q. C., LU, Y. Q., GUO, Q. Y., XIA, F. & WANG, J. G. 2023. Advanced application of nanotechnology in active constituents of Traditional Chinese Medicines. *Journal of Nanobiotechnology*, 21.
- RAUF, S., ORTIZ, R., SHEHZAD, M., HAIDER, W. & AHMED, I. J. H. 2020a. The exploitation of sunflower (*Helianthus annuus* L.) seed and other parts for human nutrition, medicine and the industry. 43, 167-184.
- RAUF, S., WARBURTON, M., NAEEM, A. & KAINAT, W. J. O. 2020b. Validated markers for sunflower (*Helianthus annuus* L.) breeding. 27, 47.

- REED, R. C., BRADFORD, K. J. & KHANDAY, I. J. H. 2022. Seed germination and vigor: ensuring crop sustainability in a changing climate. 128, 450-459.
- ROY, A., SINGH, M. J. J. O. A. I. B. & BIOTECHNOLOGY 2024. Exploring the Genetic Wealth of Sunflower (*Helianthus annuus* L.): A Comprehensive Review on Its Products and By-Products. 27, 388-402.
- SALES, H. B. E., DE S. CAROLINO, A., DE A. NUNES, R. Z., MACALIA, C. M. A., RUZO, C. M., DA C. PINTO, C., DE A. BEZERRA, J., CAMPELO, P. H., TĀLU, S., DE SOUZA, L. K. C. & SANCHES, E. A. 2024. Advances in Agricultural Technology: A Review of Slow-Release Nanofertilizers and Innovative Carriers. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 55, 1849-1882.
- SEILER, G., GULYA, T. & MAREK, L. F. J. H. 2023. Fifty years of collecting wild *Helianthus* species for cultivated sunflower improvement. 46, 1-51.
- SHARMA, A., SHARMA, R., SEPEHYA, S. & KUMAR, A. 2024. Nanofertilizers: their effect on crop production and soil health. *Journal of Plant Nutrition*, 47, 2716-2731.
- TORREÓN, E. S. D. 2020.
- VOKHODOVA, N. R., ERGASHEV, K. H. & RASHIDOVA, S. S. 2022. Synthesis and application of chitosan hydroxyapatite: A review. *Progress on Chemistry and Application of Chitin and Its Derivatives*, 27, 5-34.
- WANG, Y., SUN, X., PENG, J., LI, F., ALI, F. & WANG, Z. 2024. Regulation of seed germination: ROS, epigenetic, and hormonal aspects. *Journal of Advanced Research*.
- WU, H. & LI, Z. 2022. Nano-enabled agriculture: How do nanoparticles cross barriers in plants? *Plant Communications*, 3, 100346.
- WU, Y., ZHANG, J., LI, C., DENG, X., WANG, T. & DONG, L. 2023. Genome-wide analysis of TCP transcription factor family in sunflower and identification of HaTCP1involved in the regulation of shoot branching. *BMC Plant Biology*, 23.
- YAN, H., HAO, L., CHEN, H., ZHOU, X., JI, H. & ZHOU, H. 2023. Salicylic acid functionalized zein for improving plant stress resistance and as a nanopesticide carrier with enhanced anti-photolysis ability. *Journal of Nanobiotechnology*, 21.
- YILDIRIM, G. H. & AY, E. B. 2023. Effects of Nanofertilizer Applications at Different Growth Stages of Sweet Corn (*Zea mays* var. *saccharata*) on Biochemical Stress Factors. *Legume Research: An International Journal*, 46, 1332-1338.
- ZAREI, M., FALLAH, H., NIKNEJAD, Y. & TARI, D. B. 2023. The application of nanoparticles on the yield and nutritional quality of rice under different irrigation regimes. *Water Supply*, 23, 3345-3358.
- ŻUKOWSKA, G., DURCZYŃSKA, Z., ROSZKOWSKI, S., MYSZURA-DYMEK, M. & BIK-MAŁODZIŃSKA, M. 2024. Possibilities of Using Bio-Based Nanomaterials in Sustainable Agriculture. *Journal of Ecological Engineering*, 25, 313-322.