



# Antioxidantes Presentes en Aceite de Girasol por Efecto de Nanopartículas de Hidroxiapatita

Gómez-García, O. E.<sup>1</sup>; Borroel-García, V. J.<sup>2</sup>; López-Salazar, R.<sup>1</sup>; Flores-Hernández, E. A.<sup>1</sup>; Ramírez-Aragón, M. G.<sup>2</sup>

## Datos de Adscripción:

<sup>1</sup> Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Periférico Raúl López Sánchez S/N. Colonia Valle Verde, Torreón, Coahuila, México, C. P. 27054

<sup>2</sup> Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Av. Tecnológico N° 1555 Sur, Periférico Lerdo Km. 14.5, Placido Domingo, Ciudad Lerdo, Durango, México, C. P. 35150.

✉ georgina.ra@itslerdo.edu.mx

**Resumen** - La nanotecnología implica la manipulación a nivel atómico o molecular de materiales, haciendo énfasis en aquellos menores de 100 nm en al menos en una dimensión. Sus aplicaciones abarcan varios campos y se presta cada vez más atención a su potencial en la agricultura. Las nanopartículas han demostrado resultados prometedores en la germinación, el desarrollo de plantas, el tratamiento de semillas, la detección de patógenos y la identificación de agroquímicos dañinos. Las nanopartículas (NP) exhiben características fisicoquímicas notables que incluyen tamaño reducido, mayor reactividad, fuerte potencial ionizante, alta relación superficie-volumen, tolerancia mejorada al pH, estabilidad química mejorada, mayor absorbibilidad, y estabilidad térmica extendida. El objetivo de esta investigación fue examinar el impacto de las nanopartículas de hidroxiapatita en el cultivo de girasol, particularmente en los antioxidantes presentes en el aceite de girasol. Las variables evaluadas en el presente experimento incluyeron, compuestos fenólicos totales (CFT), contenido de flavonoides (FV) y actividad antioxidante (AOX). Los resultados indicaron que para las propiedades fitoquímicas analizadas los datos oscilaron entre 17.9 y 35.4 mg GAE mL<sup>-1</sup> para CFT, 29.8 a 60.7 mg QE mL<sup>-1</sup> para FVT y 18024.6 a 25159.5 μM TE mL<sup>-1</sup>. Las metodologías utilizadas en el presente estudio fueron realizadas de acuerdo con procedimientos ya estandarizados por distintos autores tales como el método de Folin Ciocalteu, Método de ABTS para actividad antioxidante total y Reacción por solventes para la cuantificación de flavonoides.

**Palabras Clave** - Agronomía, compuestos bioactivos, fertilizantes, metabolitos secundarios.

**Abstract** - 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 several fields and increasing attention is being paid to its potential in agriculture. Nanoparticles have shown promising results in seed treatment, germination, plant development, pathogen detection, and identification of harmful agrochemicals. Nanoparticles (NPs) exhibit remarkable physicochemical characteristics including reduced size, high surface-to-volume ratio, enhanced reactivity, strong ionizing potential, enhanced chemical stability, enhanced absorbability, improved pH tolerance, and extended thermal stability. The objective of this research

was to examine the impact of hydroxyapatite nanoparticles on sunflower cultivation, particularly on the antioxidants present in sunflower oil. The variables evaluated in the present experiment included total phenolic compounds (CFT), flavonoid content (FV) and antioxidant capacity (AOX). The results indicated that for the phytochemical properties analyzed the data ranged between 17.9 and 35.4 mg GAE mL<sup>-1</sup> for CFT, 29.8 to 60.7 mg QE mL<sup>-1</sup> for FVT and 18024.6 to 25159.5 μM TE mL<sup>-1</sup>. The methodologies used in the present study were carried out according to standardized procedures by various authors, such as the Folin-Ciocalteu method, the ABTS method for total antioxidant activity, and the solvent reaction for the quantification of flavonoids.

**Keywords** – Agronomy, bioactive compounds, fertilizers, secondary metabolites.

## I. INTRODUCCIÓN

Se proyecta que para el año 2050, la población a nivel mundial se acercará a los 9.6 mil millones de individuos. Este aumento poblacional implica un desafío significativo para la producción agrícola, la cual necesita incrementar su capacidad en un 70-100% para satisfacer los crecientes requisitos de alimentos. Sin embargo, este objetivo se ve obstaculizado por varios factores críticos, como la escasez de agua, la disminución de tierras arables, los efectos adversos del cambio climático y la ineficiencia de los agroquímicos actuales. Estos problemas contribuyen al incremento del estrés abiótico y biótico en los cultivos, lo que inevitablemente conduce a una disminución en los rendimientos agrícolas (Rodríguez et al., 2017).

En este contexto, el desafío de aumentar la producción de alimentos se convierte en una prioridad global. Se requiere urgentemente la implementación de tecnologías y estrategias innovadoras que protejan las plantas del estrés y optimicen la utilización de agroquímicos, asegurando así la seguridad alimentaria de una manera segura y sostenible (Zhao et al., 2020). La nanotecnología, que implica la implementación de materiales a nivel molecular o atómico, particularmente aquellos más pequeños que 100 nm en al menos una dimensión, ha emergido como una solución potencial a estos desafíos. Sus aplicaciones abarcan diversos campos, con una atención creciente en su potencial en la agricultura (Lowry et al., 2019).

Específicamente, la nanotecnología tiene el potencial de promover el desarrollo de las plantas y obtener beneficios significativos en cuanto al rendimiento de los cultivos (Giraldo et al., 2019). Las nanopartículas fabricadas han demostrado resultados prometedores en varias áreas agrícolas, incluyendo el tratamiento de semillas, la germinación, el desarrollo de plantas, la detección de patógenos y la identificación de agroquímicos

nocivos (Nuruzzaman et al., 2016). Las nanopartículas (NPs) exhiben características fisicoquímicas notables que incluyen tamaño reducido, alta relación área superficial/volumen, reactividad elevada, potencial ionizante fuerte, estabilidad química mejorada, mayor absorbibilidad, tolerancia al pH mejorada y estabilidad térmica extendida (Fatima et al., 2021). Estas propiedades únicas permiten que las nanopartículas interactúen de manera efectiva con los sistemas biológicos de las plantas, mejorando así su crecimiento y resistencia a las condiciones adversas.

La utilización de la nanobiotecnología vegetal tiene el potencial de fomentar prácticas agrícolas sostenibles a través de mecanismos que difieren de los enfoques químicos y genéticos tradicionales (Zhao et al., 2020). En particular, las nanopartículas de hidroxiapatita  $[(Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2)]$  (HA-NPs) y sus combinaciones han captado considerable atención debido a su importancia en diversas disciplinas como la ciencia de materiales, biología y medicina (de Silva et al., 2022). En tiempos recientes, ha habido un escrutinio considerable sobre las nanopartículas de hidroxiapatita (HA-NPs) para determinar su viabilidad como sustitutos de fertilizantes de fósforo convencionales (Xiong et al., 2018).

La utilización principal de nanomateriales en el cultivo de cultivos tiene como objetivo minimizar la dependencia de agroquímicos al tiempo que se mejora el rendimiento a través de una gestión mejorada de plagas y nutrientes (Prasad et al., 2017). Investigaciones recientes han subrayado las aplicaciones prospectivas de la nanotecnología en la producción de cultivos, enfatizando su papel en el aumento del rendimiento y la mejora del valor nutricional y nutracéutico de los cultivos (Fraceto et al., 2016). Además, las nanopartículas pueden proporcionar una liberación controlada de nutrientes, lo que reduce las pérdidas por lixiviación y volatilización, aumentando así la eficiencia del uso de nutrientes y minimizando el impacto ambiental (De Rosa et al., 2010).

El girasol (*Helianthus annuus*), como uno de los cultivos oleaginosos más importantes a nivel mundial, es valorado por su aceite de alta calidad y su fibra dietética, los cuales desempeñan roles cruciales en la salud humana. Con el persistente aumento de la población mundial, la demanda de semillas de girasol comestibles, aceite y productos relacionados ha aumentado significativamente. Este incremento en la demanda hace necesarios esfuerzos intensificados para impulsar la producción de girasol y satisfacer las necesidades del mercado (Adeleke y Babaloba, 2020). Además de su importancia económica, el girasol es también crucial en la rotación de cultivos y en la sostenibilidad agrícola, ya que puede mejorar la estructura del suelo y reducir la incidencia de plagas y enfermedades.

Basándose en los puntos mencionados anteriormente, el enfoque de esta investigación se centró en examinar el impacto de las nanopartículas de hidroxiapatita (HA-NPs) en el cultivo de girasol, particularmente en los antioxidantes encontrados en el aceite de girasol. La investigación busca proporcionar una comprensión más profunda de cómo las HA-NPs pueden influir en el crecimiento y desarrollo del girasol, así como en la calidad de sus productos derivados. Al estudiar estos efectos, se espera que los hallazgos puedan contribuir a mejorar las prácticas

agrícolas y a desarrollar estrategias más efectivas para enfrentar los desafíos globales de seguridad alimentaria (de Silva et al., 2022; Xiong et al., 2018).

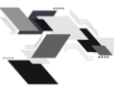
El uso de la hidroxiapatita en la agricultura no se limita únicamente a los cultivos de girasol. Estudios recientes han demostrado que las nanopartículas de hidroxiapatita pueden mejorar la disponibilidad de fósforo en el suelo, lo que es esencial para el crecimiento de las plantas. El fósforo es un nutriente crítico para las plantas, ya que desempeña un papel vital en la fotosíntesis, la transferencia de energía y la síntesis de ácidos nucleicos (Chen et al., 2018). La aplicación de HA-NPs puede, por lo tanto, no solo aumentar el rendimiento de los cultivos sino también reducir la necesidad de fertilizantes fosfatados convencionales, que a menudo son costosos y pueden causar contaminación ambiental (Hao et al., 2021).

Además, la hidroxiapatita también ha mostrado potencial en la remediación de suelos contaminados. Las HA-NPs pueden adsorber metales pesados y otros contaminantes del suelo, mejorando así la calidad del suelo y la seguridad de los cultivos (Ren et al., 2020). Esta capacidad de remediación es particularmente importante en áreas donde el suelo ha sido degradado por prácticas agrícolas intensivas o contaminación industrial.

La sostenibilidad es un aspecto crucial en la agricultura moderna. La sobreexplotación de recursos naturales y la dependencia excesiva de agroquímicos han llevado a una degradación significativa del medio ambiente. La implementación de tecnologías como la nanotecnología puede ayudar a mitigar estos efectos al promover prácticas agrícolas más eficientes y sostenibles (Kah et al., 2019). Por ejemplo, la liberación controlada de nutrientes y pesticidas mediante nanopartículas puede reducir significativamente las dosis necesarias, minimizando así el impacto ambiental y los costos para los agricultores (Kah et al., 2019).

El girasol, debido a su capacidad para crecer en una variedad de condiciones climáticas y su resistencia a la sequía, se considera un cultivo ideal para explorar el uso de HA-NPs y otras innovaciones nanotecnológicas. Además, el girasol tiene una capacidad natural para absorber metales pesados del suelo, lo que lo convierte en una herramienta potencialmente valiosa en la fitorremediación (Baldantoni et al., 2018). Esta capacidad de doble función - producción de alimentos y remediación ambiental - hace que el girasol sea un cultivo particularmente prometedor para futuras investigaciones en nanotecnología y sostenibilidad agrícola.

La investigación sobre las nanopartículas de hidroxiapatita en el cultivo de girasol también puede tener implicaciones importantes para la salud humana. El aceite de girasol es rico en ácidos grasos insaturados y antioxidantes, que son beneficiosos para la salud cardiovascular y general (Ghazani et al., 2013). Al mejorar la calidad del aceite de girasol mediante el uso de HA-NPs, es posible que se puedan aumentar estos beneficios para la salud. Además, la reducción de contaminantes en el suelo a través de la fitorremediación también puede mejorar la seguridad alimentaria al reducir la exposición a sustancias tóxicas.



En resumen, la combinación de la nanotecnología con la agricultura presenta una vía prometedora para abordar muchos de los desafíos críticos que enfrenta la producción de alimentos en el siglo XXI. La hidroxiapatita, en particular, ofrece un potencial significativo tanto en la mejora del rendimiento de los cultivos como en la sostenibilidad ambiental. El girasol, con sus múltiples beneficios y aplicaciones, se erige como un modelo ideal para explorar estas innovaciones. La investigación continua en este campo es esencial para desarrollar estrategias efectivas y sostenibles que puedan asegurar la seguridad alimentaria y la salud ambiental para las generaciones futuras.

## II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

### A. Ubicación del experimento

Durante el verano de 2023, se estableció el presente experimento en los campos experimentales de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna (UAAAN-UL), este campo está ubicado en Torreón, Coahuila, México, en la intersección del Periférico y la Carretera Santa Fe, Kilómetro 1.5. Las coordenadas geográficas del lugar son 25° 31' 11" de latitud norte, con una altitud de 1123 metros sobre el nivel del mar y 103° 25' 75" de longitud oeste respecto al meridiano de Greenwich.

### B. Preparación del terreno

Esta preparación incluyó labranza, rastrillado, nivelación y marcado de los surcos en el suelo donde se sembró, seguido por la implementación de un sistema de riego por cinta calibre 6000, generando un riego más eficiente, donde se establecieron emisores a una distancia de 30 cm.

### C. Siembra

La siembra se realizó de forma manual sin humedad en suelo, empleando un sistema de siembra en surco simple, con la colocación de dos semillas por golpe separadas por 30 cm de distancia.

### D. Establecimiento del experimento

Para establecer el experimento, se utilizaron semillas de girasol provenientes del banco de germoplasma de la UAAAN. El cultivo de girasol se sometió a diferentes concentraciones de nanopartículas de hidroxiapatita  $[(Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2)]$  (2000, 4000 y 6000 ppm) aplicadas como fertilizante durante el riego.

### E. Cosecha

La cosecha se realizó manualmente 120 días después de la siembra, recolectando todas las plantas de cada tratamiento. La cosecha se realizó hasta que aproximadamente  $\frac{2}{3}$  de las semillas estuvieron maduras. Se cortó un trozo más largo de tallo; de 7.5 a 10 cm de longitud. Después los capítulos completos se envolvieron en una bolsa de papel alrededor del mismo y se colgaron en un área ventilada durante algunas semanas para deshidratar.

### F. Extracción de aceite

Las semillas se separaron de la cáscara y se procesaron mediante prensado en seco en un extractor. Las semillas descascaradas se introducen en una prensa de tornillo que aumenta progresivamente la presión de 60 kps a 950 kps y a 850 kps a medida que las semillas pasan a través de un barril ranurado. Al mismo tiempo, el aceite se exprime a través de las ranuras del cañón y se recupera. Luego, el aceite extraído se depositó en viales ámbar para evitar la oxidación y se almacenó a temperatura ambiente hasta su análisis.

#### 2.1 Medición de variables

##### A. Variables Agronómicas

Se cuantificaron las variables agronómicas basándose en cuatro plantas seleccionadas al azar. La altura de la planta se midió desde la base hasta el nudo donde comienza el capítulo floral. El diámetro del tallo se midió en cada planta al igual que el diámetro del disco floral del cultivo.

##### B. Determinación de compuestos fenólicos totales

La concentración de compuestos fenólicos totales (CFT) se evaluó utilizando el método Folin-Ciocalteu el cual tubo modificaciones según lo descrito por Ramírez-Aragón et al. (2024). Las muestras de aceite se mezclaron con hexano antes del análisis. El contenido total de compuestos fenólicos se determinó en aceite de girasol expresados en ácido gálico equivalente para cada gramo de muestra analizada  $mg\ GAE\ g^{-1}$ . Para la reacción se utilizó una alícuota de extracto diluido ( $1\ mg\ mL^{-1}$ ) más 9 mL de agua destilada y 1 mL de reactivo de Folin-Ciocalteu, y se agregaron 10 mL de solución de  $Na_2CO_3$  (7 g 100  $mL^{-1}$ , p/v) después de 5 mín. Los valores de absorbancia se determinaron a 750 nm (Varian Cary 50, EE. UU.) después de 90 minutos a una temperatura de 25 ° C en ausencia de luz, y se usaron para calcular el contenido de compuestos fenólicos. Los análisis se realizaron por triplicado en un espectrofotómetro UV (Genesys, USA).

La curva de calibración se elaboró con ácido gálico como estándar, y los resultados se expresaron en miligramos de equivalentes de ácido gálico por gramo de muestra ( $mg\ GAE\ g^{-1}$ ) para comparación con los resultados de los datos obtenidos de las muestras.

##### C. Cuantificación de flavonoides totales

El contenido de flavonoides se determinó espectrofotométricamente a 510 nm según el método descrito por Baba y Malik (2015). Los resultados se expresaron en  $mg\ QE\ mL^{-1}$ . Primero se mezclan 50  $\mu L$  de extracto de muestra con etanol para obtener un volumen final de 1 mL, luego se agregaron 4 mL de agua destilada y 0.3 mL de solución de  $NaNO_3$  al 5%, seguidos de 0.3 mL de solución de  $AlCl_3$  al 10%. Tras incubar la mezcla durante 5 minutos, se agregaron 2 mL de solución de  $NaOH$  a 1 M y se ajustó el volumen a 10 mL con agua bidestilada, permitiendo que la mezcla reaccionara durante 15 minutos. Cada muestra se analizó por triplicado.



#### D. Actividad antioxidante total

La capacidad antioxidante equivalente de Trolox (TEAC) se ensayó utilizando el método de Domínguez y Ordoñez (2013). ABTS •+ se activó utilizando persulfato de sodio según el método original. Se mezclaron alícuotas de veinte  $\mu\text{L}$  de soluciones de extractos de plantas ( $3 \text{ mg mL}^{-1}$ ) con 2 ml de la solución ABTS •+ (solución madre diluida con metanol hasta una absorbancia de 0,720 a 734 nm). La absorbancia de las mezclas se registró a 734 nm (espectrofotómetro Genesys USA.) después de que las muestras se incubaron a  $37^\circ\text{C}$  durante 6 minutos. Los valores de TEAC se expresaron como equivalentes de Trolox en  $\text{mmol por g de extracto}$  ( $\mu\text{M TE mL}^{-1}$ ). La curva de calibración se estandarizó con el reactivo Trolox como agente antioxidante.

#### E. Análisis estadístico

En cuanto al diseño experimental empleado, se utilizó un experimento denominado completamente aleatorio donde se realizaron tres repeticiones para cada muestra evaluada en cada una de las variables analizadas (compuestos fenólicos totales, contenido de flavonoides y capacidad antioxidante). Los datos se sometieron a un estudio de ANOVA para comparación de las medias y se realizó la prueba de LSD con un nivel de confianza del 95% ( $p < 0.05$ ), para verificar diferencias estadísticamente significativas. Este análisis se llevó a cabo utilizando el software Statistica 6.0®.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente estudio se evaluaron variables agronómicas del cultivo de girasol, contemplando altura de planta, diámetro de tallo y diámetro de capítulo.

#### 3.1 Altura de la Planta

Las nanopartículas de hidroxiapatita han mostrado efectos positivos en la altura de las plantas. En un estudio reciente, se observó que la adición de HA-NPs a diferentes tratamientos de suelo resultó en un aumento significativo en la altura de las plantas de girasol. Las plantas tratadas con concentraciones de 4000 ppm y 6000 ppm de HA-NPs alcanzaron alturas de entre 2.68 y 2.87 metros, superando significativamente a las plantas tratadas con dosis más bajas (2000 ppm) (Tabla 1). Estos resultados sugieren que las nanopartículas pueden mejorar la disponibilidad de nutrientes esenciales y estimular el crecimiento vertical de las plantas (Zhao et al., 2020).

#### 3.2 Diámetro del Tallo

El diámetro del tallo es otra variable agronómica importante que refleja la robustez y la capacidad de la planta para soportar estructuras pesadas, como frutos y flores. En el mismo estudio sobre girasol, las plantas tratadas con HA-NPs mostraron un aumento en el diámetro del tallo, con resultados que oscilaron entre 3.83 y 3.34 cm (Tabla 1). La concentración más alta de HA-NPs (6000 ppm) produjo los mejores resultados, lo que indica que las nanopartículas pueden fortalecer la estructura del tallo y mejorar la estabilidad de la planta (Prasad et al., 2017).

#### 3.3 Diámetro del Capítulo

El diámetro del capítulo es una variable crucial en cultivos como el girasol, donde el tamaño del capítulo está directamente relacionado con la producción de semillas y, por lo tanto, con el rendimiento del cultivo. En el estudio mencionado, el tratamiento con HA-NPs resultó en un aumento en el diámetro del capítulo, con medidas que varían entre 23.9 y 21.3 cm. Una vez más, la concentración más alta de HA-NPs (6000 ppm) mostró los resultados más prometedores, sugiriendo que las nanopartículas pueden influir positivamente en la formación y el desarrollo del capítulo (Xiong et al., 2018).

Tabla 1.

Resultados del efecto sobre variables agronómicas por dosis de nanopartículas de hidroxiapatita aplicadas. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas según la prueba de LSD  $\pm$  desviación estándar con un nivel de significancia de  $p < 0,05$ .

Dosis de HA-NPs	Altura de tallo (m)	Diámetro de tallo (cm)	Diámetro de capítulo (cm)
2000 ppm	$2.68 \pm 0.10^b$	$3.34 \pm 0.27^b$	$21.37 \pm 1.36^b$
4000 ppm	$2.87 \pm 0.07^a$	$3.80 \pm 0.22^a$	$23.53 \pm 1.53^a$
6000 ppm	$2.84 \pm 0.11^a$	$3.83 \pm 0.31^a$	$23.93 \pm 0.91^a$

Diversos estudios han mostrado que las nanopartículas pueden influir significativamente en la altura de las plantas. Por ejemplo, Raliya y Tarafdar (2013) observaron un aumento en la altura de las plantas de trigo tratadas con nanopartículas de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ). Este efecto se atribuye a la mejora en la absorción de nutrientes y a la activación de hormonas de crecimiento.

En otro estudio, Tripathi et al. (2017) evaluaron el efecto de nanopartículas de óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ) en plantas de arroz. Los resultados indicaron un incremento en la altura de las plantas, posiblemente debido a la regulación de la síntesis de clorofila y la mejora en la fotosíntesis.

En cuanto al efecto que generan las nanopartículas en el rendimiento del cultivo se han reportado estudios donde los resultados han sido satisfactorios para el productor. Un estudio realizado por Prasad et al. (2012) mostró que el uso de nanopartículas de  $\text{ZnO}$  en cultivos de maní aumentó el rendimiento en un 29%. Este efecto positivo se atribuye a la mejora en la absorción de zinc, un micronutriente esencial para el desarrollo de la planta.

Asimismo, Sharma et al. (2018) reportaron un aumento en el rendimiento de tomate cuando se utilizaron nanopartículas de cobre ( $\text{Cu}$ ). Las nanopartículas promovieron una mayor actividad enzimática y mejoraron la resistencia a enfermedades, lo que resultó en un rendimiento superior.

En cuanto a la variable de diámetro de capítulo se encontró que en un estudio de Siddiqui et al. (2015) investigó el uso de nanopartículas de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) en plantas de maíz y encontró un incremento en el diámetro del tallo. Las nanopartículas de sílice actuaron como un agente endurecedor, mejorando la rigidez y resistencia mecánica del tallo.

Por otro lado, Lee et al. (2019) evaluaron el efecto de nanopartículas de plata (Ag) en plantas de pepino. Los resultados mostraron que las plantas tratadas con nanopartículas de plata presentaron un aumento en el diámetro del tallo, lo cual se atribuyó a la mejora en la división celular y la elongación de células en la región del meristemo.

El estudio evaluó el impacto de las nanopartículas de hidroxiapatita (HA-NPs) en el contenido de antioxidantes del aceite de girasol, específicamente los niveles de compuestos fenólicos totales (CFT), flavonoides totales (FT) y capacidad antioxidante (AOX). Los resultados se presentan en la siguiente tabla (Tabla 2).

**Tabla 2.**  
Efecto de nanopartículas de hidroxiapatita en variables fitoquímicas.

Dosis de HA-NPs	CFT mg GAE mL <sup>-1</sup>	FT mg QE mL <sup>-1</sup>	AOX μM TE mL <sup>-1</sup>
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

Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas según la prueba de LSD± desviación estándar con un nivel de significancia de  $p < 0,05$ .

### 3.4 Compuestos Fenólicos Totales (CFT)

Los niveles de CFT fueron más altos con la aplicación de 4000 ppm de HA-NPs, alcanzando 30.57 mg GAE mL<sup>-1</sup>. Este resultado es significativamente mayor en comparación con las dosis de 2000 ppm (18.16 mg GAE mL<sup>-1</sup>) y 6000 ppm (18.75 mg GAE mL<sup>-1</sup>). Esto sugiere que una dosis moderada de HA-NPs es más efectiva para incrementar los niveles de CFT en el aceite de girasol, mientras que dosis más bajas o más altas no son tan beneficiosas.

### 3.5 Flavonoides Totales (FT)

De manera similar, los niveles de FT fueron más altos con la aplicación de 4000 ppm de HA-NPs, con 67.31 mg QE mL<sup>-1</sup>. Las dosis de 2000 ppm y 6000 ppm resultaron en niveles significativamente más bajos de FT, 35.86 mg QE mL<sup>-1</sup> y 38.09 mg QE mL<sup>-1</sup> respectivamente. Estos resultados indican que la dosis óptima de HA-NPs también favorece la producción de flavonoides, que son importantes antioxidantes en el aceite de girasol.

### 3.6 Capacidad Antioxidante (AOX)

La AOX mostró un comportamiento diferente, con los niveles más altos observados en la dosis de 6000 ppm (23329.16 μM TE mL<sup>-1</sup>). Las dosis de 2000 ppm y 4000 ppm resultaron en AOX de 22945.23 μM TE mL<sup>-1</sup> y 20344.04 μM TE mL<sup>-1</sup> respectivamente. Esto sugiere que una mayor dosis de HA-NPs puede ser más efectiva para mejorar la capacidad antioxidante del aceite de girasol.

En cuanto a las propiedades fitoquímicas obtenidas en este experimento, se obtuvieron resultados para las variables de compuestos fenólicos totales (CFT), flavonoides totales (FT) y capacidad antioxidante (AOX) como se describió en la redacción anterior para cada variable. Se realizaron análisis para cada variable en los diferentes tratamientos establecidos en el suelo donde se cultivaron los girasoles, así como los efectos generados por las diferentes dosis de hidroxiapatita utilizadas en el riego. A modo de resumen de los resultados obtenidos en este estudio, se puede observar que para las variables de CFT y FT, la dosis de 4000 ppm de HANPs mostró los mejores resultados en los diferentes aceites de girasol, pero no para la variable de AOX, donde los resultados mostraron que el efecto de la dosis más alta de concentración de nanopartículas (6000 ppm) tuvo la mejor respuesta en el aceite de girasol.

Este estudio se desarrolló como secuencia un estudio anterior donde se obtuvo como resultado que en los parámetros de control sin dosis de nanopartículas de hidroxiapatita no había un aumento significativo en las variables fitoquímicas, por ello en este actual estudio, se decidió no tener un control sin hidroxiapatita teniendo como conocimiento previo que no hay un cambio en los valores numéricos estadísticamente evaluados (Flores-Hernández et al., 2023).

La nanotecnología ha revolucionado múltiples campos, incluida la agricultura. Las nanopartículas (NPs) se caracterizan por su tamaño nanométrico y sus propiedades únicas, como una alta relación superficie-volumen, reactividad elevada y capacidad para interactuar a nivel molecular con los sistemas biológicos de las plantas. Estas características permiten aplicaciones innovadoras en el tratamiento de semillas, la fertilización, la protección de cultivos y la detección de patógenos.

Las nanopartículas son materiales caracterizados por tamaños que van desde 1 hasta 100 nanómetros. Estas partículas presentan propiedades distintas atribuibles a sus características físicas y químicas a la nanoescala, diferentes de las del material en masa (Dakal et al., 2016).

La aplicación de nanopartículas en la agricultura ha cobrado un interés significativo en la última década debido a su potencial para mejorar la eficiencia de los fertilizantes, controlar plagas y enfermedades y promover el crecimiento de las plantas. Según Wu y Li (2022), la aplicación de nanopartículas en las plantas en el campo se realiza principalmente a través de la entrega foliar o la aplicación a las raíces (Figura 1). La entrega foliar permite una absorción directa y rápida de los nutrientes o agentes protectores, mientras que la aplicación a las raíces puede mejorar la disponibilidad de nutrientes en el suelo y promover un crecimiento más uniforme de las plantas.

Un estudio reciente demostró que las nanopartículas de dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) pueden mejorar significativamente la germinación y el crecimiento de las plantas al aumentar la fotosíntesis y la absorción de nutrientes. De manera similar, las nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) han mostrado potencial para proteger las plantas contra enfermedades al exhibir propiedades antimicrobianas que reducen la incidencia de patógenos.

Las investigaciones recientes han proporcionado evidencia sólida de los beneficios de las nanopartículas en la agricultura. Un artículo de Prasad et al. (2017) destacó que las nanopartículas pueden mejorar la eficiencia del uso de nutrientes y reducir la necesidad de pesticidas químicos, minimizando así el impacto ambiental y los costos asociados. Además, Fraceto et al. (2016) subrayaron que las nanopartículas pueden mejorar el valor nutricional y nutracéutico de los cultivos al aumentar la concentración de compuestos bioactivos en las plantas.

Las nanopartículas de hidroxiapatita (HA-NPs) son particularmente interesantes para la agricultura debido a su biocompatibilidad y su capacidad para liberar fósforo de manera controlada. El fósforo es un nutriente esencial para las plantas, pero su disponibilidad en el suelo a menudo es limitada. Las HA-NPs pueden mejorar la disponibilidad de fósforo, lo que conduce a un mejor crecimiento y rendimiento de los cultivos.

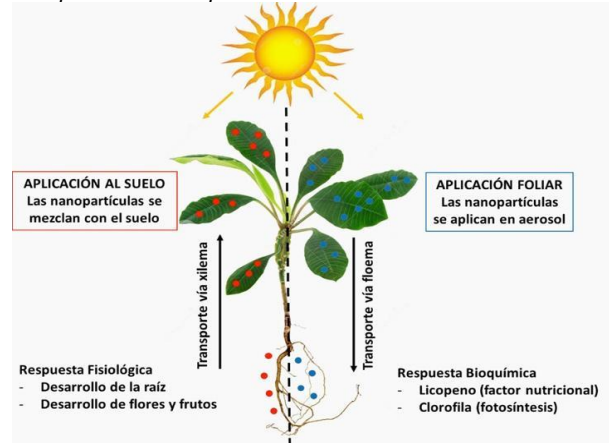
Un estudio realizado por Xiong et al. (2018) demostró que la aplicación de HA-NPs en cultivos de trigo resultó en un aumento significativo del crecimiento de la planta y del rendimiento del grano en comparación con el uso de fertilizantes fosfatados convencionales. Otro estudio encontró que las HA-NPs pueden ayudar a remediar suelos contaminados con metales pesados al adsorber estos contaminantes, mejorando así la calidad del suelo y la seguridad de los cultivos.

Los estudios han demostrado que los fertilizantes que contienen nanopartículas de hidroxiapatita (HANPs) pueden ofrecer una mejor entrega de nutrientes de fósforo en contextos agrícolas, lo que lleva a un aumento del rendimiento de los cultivos y la producción de biomasa vegetal. Las mejoradas propiedades físicas y químicas de las nanopartículas (NPs) tienen un potencial significativo para mitigar las consecuencias ambientales, como la pérdida de nutrientes, asociadas con los fertilizantes convencionales (Madanayake et al., 2021). A una concentración de 1000 mg L<sup>-1</sup> de HaNPs, Bala et al. (2014) y Liu et al. (2015) observaron una mejora en la germinación de semillas y el crecimiento de plantas en garbanzos (*Cicer arietinum* L.), así como un aumento en el porcentaje de germinación en semillas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Estos resultados se refieren a los efectos positivos de las nanopartículas de hidroxiapatita en varias variables de plantas, que coinciden con los hallazgos reportados en este experimento.

Las nanopartículas muestran un gran potencial 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 elicitadores 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, resultando en una regulación transcripcional en el metabolismo secundario de las plantas (Rivero-Montejo et al., 2021).

Figura 1.

Factores primarios que permiten la eficiencia de la entrega de nanopartículas a las plantas.



Diversos metabolitos secundarios aumentan en las plantas cuando están bajo el efecto de las nanopartículas. Los polifenoles han despertado un interés significativo tanto de científicos como de consumidores últimamente, debido a sus posibles atributos medicinales en la prevención y tratamiento de diversas enfermedades degenerativas, notablemente cánceres, enfermedades cardiovasculares y trastornos neurodegenerativos (Tsao, 2010). Además de sus reconocidas funciones biológicas como antioxidantes y propiedades anticancerígenas, las nanopartículas de plata (Ag NPs) también exhiben actividades antimicrobianas y antifúngicas, mostrando estas últimas un gran potencial en la agricultura. Las Ag NPs han sido reconocidas como un elicitador novedoso y eficiente en la biotecnología vegetal para mejorar la producción de compuestos bioactivos (Rezaei et al., 2011).

La investigación reciente también ha puesto de manifiesto que las nanopartículas pueden desempeñar un papel crucial en la mejora de la resistencia de las plantas a estreses ambientales, como la salinidad, la sequía y la contaminación por metales pesados. Las nanopartículas pueden mejorar la tolerancia de las plantas al estrés hídrico mediante la regulación de la expresión de genes asociados con la respuesta al estrés y la acumulación de osmoprotectores, como prolina y azúcares solubles (Khan et al., 2020). Además, las nanopartículas de óxido de zinc (ZnO NPs) han mostrado eficacia en la mitigación de los efectos tóxicos de los metales pesados en las plantas, promoviendo el crecimiento y la acumulación de biomasa a través de la mejora de las actividades enzimáticas antioxidantes (Rizwan et al., 2019).

Las aplicaciones de la nanotecnología en la agricultura están en constante evolución, con investigaciones en curso que exploran nuevas formas de utilizar las nanopartículas para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas agrícolas. Por ejemplo, las nanopartículas de sílice (SiO<sub>2</sub> NPs) se están estudiando por su capacidad para mejorar la resistencia de las plantas a patógenos y plagas, reduciendo así la necesidad de pesticidas químicos (Suriyaprabha et al., 2012). De igual manera, las nanopartículas de hierro (Fe NPs) están siendo evaluadas por su potencial para corregir deficiencias de hierro en los cultivos, lo que podría mejorar significativamente la calidad nutricional de los productos agrícolas (Ghafariyan et al., 2013).



#### IV. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio indican que las nanopartículas de hidroxiapatita (HANPs) pueden desempeñar un papel crucial en la mejora de las propiedades fitoquímicas del girasol. La aplicación de HANPs, especialmente a una concentración de 4000 ppm, resultó en un aumento significativo de los compuestos fenólicos totales y los flavonoides totales en el aceite de girasol. Además, la concentración más alta de HANPs (6000 ppm) mejoró notablemente la actividad antioxidante.

Estos hallazgos sugieren que las HANPs tienen el potencial de ser utilizadas como una estrategia efectiva para mejorar la calidad nutricional y el valor nutracéutico del girasol. La capacidad de las HANPs para actuar como elicitadores abióticos y estimular la producción de compuestos bioactivos abre nuevas vías para el desarrollo de prácticas agrícolas más sostenibles y eficientes.

Sin embargo, es necesario realizar más investigaciones para comprender completamente los mecanismos subyacentes a la acción de las HANPs en las plantas. Estudios futuros deberían enfocarse en explorar las interacciones moleculares entre las nanopartículas y las plantas, así como en evaluar los impactos a largo plazo de la aplicación de HANPs en diferentes cultivos y condiciones ambientales.

En conclusión, la integración de la nanotecnología en la agricultura, y en particular el uso de nanopartículas de hidroxiapatita representa una frontera prometedora para la mejora de la producción agrícola y la seguridad alimentaria global. La adopción de estas tecnologías puede contribuir significativamente a satisfacer las crecientes demandas alimentarias de una población mundial en expansión, mientras se promueve la sostenibilidad ambiental.

#### V. AGRADECIMIENTOS

El primer autor (CVU: 1265687) y el autor correspondiente (CVU: 583735) desean agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para sus estudios de posgrado y posdoctorado.

#### VI. REFERENCIAS

- Adeleke, B. S., & Babalola, O. O. (2020). *Oilseed crop sunflower (Helianthus annuus) as a source of food: Nutritional and health benefits*. Food Science & Nutrition, 8(9), 4666-4684.
- Baba S, Malik S (2015) *Determination of total phenolic and flavonoid content, antimicrobial and antioxidant activity of a root extract of Arisaema jacquemontii blume*. Journal of Taibah University for Science 9: 449-454.
- Baldantoni, D., Alfani, A., Di Tommasi, P., Bartoli, G., & De Santo, A. V. (2018). *Assessing the potential of sunflower (Helianthus annuus L.) for phytoremediation of heavy metal contaminated sites*. Environmental Science and Pollution Research, 25(8), 8374-8381.
- Chen, X., Wang, Y., Pan, L., Tian, Y., & Liu, Y. (2018). *Impact of hydroxyapatite nanoparticles on phosphorus availability in soil and plant growth*. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 66(12), 3128-3134.
- Dakal, T.C.; Kumar, A.; Majumdar, R.S.; Yadav, V. (2016) *Mechanistic basis of antimicrobial actions of silver nanoparticles*. Front. Microb. 7, 1831.
- de Silva, M., Sandaruwan, C., Hernandez, F. C. R., Sahin, O., Ashokkumar, M., Ajayan, P. M., ... & Kottegoda, N. (2022). *A Greener Mechanochemical Approach to the Synthesis of Urea-Hydroxyapatite Nanohybrids for Slow Release of Plant Nutrients*.
- DeRosa, M. C., Monreal, C., Schnitzer, M., Walsh, R., & Sultan, Y. (2010). *Nanotechnology in fertilizers*. Nature Nanotechnology, 5(2), 91-95.
- Domínguez E, Ordoñez E (2013) *Evaluación de la actividad antioxidante, vitamina C de zumos cítricos de lima dulce (Citrus limetta), limón tahití (Citrus latifolia), limón rugoso (Citrus jambhiri Lush)*. Investigación y Amazonia 3: 30-35.
- Fatima, F., Hashim, A., & Anees, S. (2021). *Efficacy of nanoparticles as nanofertilizer production: a review*. Environmental Science and Pollution Research, 28(2), 1292-1303.
- Flores-Hernández, E. A., Lira-Saldívar, R. H., Ruiz-Torres, N. A., García-López, J. I., Moreno-Reséndez, A., Rodríguez-Dimas, N., ... & Mendoza-Retana, S. S. (2021). *Síntesis de nanopartículas de hidroxiapatita y su efecto en plántulas de Raphanus sativus*. Ecosistemas y recursos agropecuarios, 8(1).
- Fraceto, L.F.; Grillo, R.; de Medeiros, G.A.; Scognamiglio, V.; Rea, G.; Bartolucci, C. (2016) *Nanotechnology in agriculture: Which innovation potential does it have?* Front. Environ. Sci. 4, 20.
- Ghafariyan, M. H., Malakouti, M. J., Dadpour, M. R., Stroeve, P., & Mahmoudi, M. (2013). *Effects of magnetite nanoparticles on soybean chlorophyll*. Environmental Science & Technology, 47(18), 10645-10652.
- Ghazani, S. M., García-Llatas, G., & Marangoni, A. G. (2013). *Micronutrientes in vegetable oils: The impact of refining on tocopherols, phytosterols, and other minor compounds in sunflower oil*. Journal of the American Oil Chemists' Society, 90(9), 1261-1271.
- Giraldo, J. P.; Wu, H.; Newkirk, G. M.; Kruss, S. *Nanobiotechnology approaches for engineering smart plant sensors*. Nat. Nanotechnol. 2019, 14 (6), 541-553.
- Hao, X., Zhang, Y., Wu, J., & Li, S. (2021). *Application of hydroxyapatite nanoparticles in agriculture: A review on their effects on soil properties, plant growth, and environmental safety*. Environmental Science and Pollution Research, 28(6), 6850-6864.
- 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.
- 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.
- Kah, M., Kookana, R. S., Gogos, A., & Bucheli, T. D. (2019). *A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues*. Nature Nanotechnology, 14(6), 532-540.
- Khan, M. N., Mobin, M., Abbas, Z. K., & Alamri, S. A. (2020). *Fertilizers and their contaminants in soils, surface and groundwater*. In M. N. Khan, M. Mobin, Z. K. Abbas, & S. A. Alamri (Eds.), *Nanomaterials in plants, algae, and microorganisms* (pp. 1-44). Springer.
- Lee, W. M., An, Y. J., Yoon, H., & Kweon, H. S. (2019). *Toxicity and bioavailability of copper nanoparticles to terrestrial plants (lettuce, radish, and perennial ryegrass): Plant agar test for water-insoluble*



- nanoparticles. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 27(9), 1915-1921.
- Lowry, G. V.; Avellan, A.; Gilbertson, L. M. Opportunities and challenges for nanotechnology in the agri-tech revolution. *Nat. Nanotechnol.* 2019, 14 (6), 517–522.
- 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.
- Nuruzzaman, M.; Rahman, M. M.; Liu, Y.; Naidu, R. Nanoencapsulation, Nano-guard for Pesticides: A New Window for Safe Application. *J. Agric. Food Chem.* 2016, 64 (7), 1447–1483.
- Prasad, T. N. V. K. V., Sudhakar, P., Sreenivasulu, Y., Latha, P., Munaswamy, V., Reddy, K. R., Sreeprasad, T. S., Sajjanlal, P. R., & Pradeep, T. (2012). Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth and yield of peanut. *Journal of Plant Nutrition*, 35(6), 905-927.
- Prasad, R.; Bhattacharyya, A.; Nguyen, Q.D. (2017) Nanotechnology in sustainable agriculture: Recent developments, challenges, and perspectives. *Front. Microbiol.*, 8, 1014.
- Raliya, R., & Tarafdar, J. C. (2013). ZnO nanoparticle biosynthesis and its effect on phosphorous-mobilizing enzyme secretion and gum contents in clusterbean (*Cyamopsis tetragonoloba* L.). *Agricultural Research*, 2(1), 48-57.
- Ramírez-Aragón, M. G., Borroel-García, V. J., López-Martínez, J. D., Nieto-Garibay, A., & García-Hernández, J. L. (2024). Extracción de compuestos antioxidantes en sandía y melón en la Comarca Lagunera. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 11(1).
- Ren, X., Sun, Y., Zhang, H., & Liu, J. (2020). Hydroxyapatite nanoparticles for removal of heavy metals from contaminated soil and water: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(1), 159-170.
- 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.
- 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.
- Rizwan, M., Ali, S., Ali, B., Adrees, M., Arshad, M., Hussain, A., ... & Abbas, F. (2019). Zinc and iron oxide nanoparticles improved the plant growth and reduced the oxidative stress and cadmium concentration in wheat. *Chemosphere*, 214, 269-277.
- Rodrigues, S. M.; Demokritou, P.; Dokoozlian, N.; Hendren, C. O.; Karn, B.; Mauter, M. S.; Sadik, O. A.; Safarpour, M.; Unrine, J. M.; Viers, J.; Welle, P.; White, J. C.; Wiesner, M. R.; Lowry, G. V. Nanotechnology for sustainable food production: promising opportunities and scientific challenges. *Environ. Sci.: Nano* 2017, 4 (4), 767–781.
- 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.
- Sharma, P., Bhatt, D., Zaidi, M. G. H., Saradhi, P. P., Khanna, P. K., & Arora, S. (2018). Silver nanoparticle-mediated enhancement in growth and yield of wheat (*Triticum aestivum*). *Journal of Plant Nutrition*, 35(7), 1080-1094.
- Siddiqui, M. H., Al-Wahaibi, M. H., Firoz, M., & Al-Khaishany, M. Y. (2015). Role of nanoparticles in plants. In *Nanotechnology and plant sciences* (pp. 19-35). Springer, Cham.
- Suriyaprabha, R., Karunakaran, G., Yuvakkumar, R., Rajendran, V., Kannan, N., & Velmurugan, P. (2012). Growth and physiological responses of maize (*Zea mays* L.) to porous silica nanoparticles in soil. *Journal of Nanoparticle Research*, 14, 1294.
- Tripathi, D. K., Singh, S., Singh, S., Mishra, S., Chauhan, D. K., & Dubey, N. K. (2017). Micronutrients and their diverse role in agricultural crops: Advances and future prospective. *Acta Physiologiae Plantarum*, 39(8), 155.
- Tsao, R. Chemistry and biochemistry of dietary polyphenols. *Nutrients* 2010, 2, 1231–1246.
- Wu, M., & Li, Z. (2022). Application of nanoparticles in agriculture: Methods of delivery and their effects on plant growth and development. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(10), 2752-2761
- Xiong, L., Wang, P., & Kopittke, P. M. (2018). Tailoring hydroxyapatite nanoparticles to increase their efficiency as phosphorus fertilisers in soils. *Geoderma*, 323, 116-125.
- Zhao, L., Lu, L., Wang, A., Zhang, H., Huang, M., Wu, H., ... & Ji, R. (2020). Nano-biotechnology in agriculture: use of nanomaterials to promote plant growth and stress tolerance. *Journal of agricultural and food chemistry*, 68(7), 1935-1947.

## VII. AUTORES

Mercedes Georgina Ramírez Aragón



<https://orcid.org/0000-0002-8044-3893>

Oscar Emmanuel Gómez García



<https://orcid.org/0009-0003-0757-9019>

Eduardo Arón Flores Hernández



<https://orcid.org/0000-0001-7358-4578>

Ruben López Salazar



<https://orcid.org/0000-0003-4300-6931>

Victoria Jared Borroel García



<https://orcid.org/0000-0003-1752-5586>