

Producción de girasol aceitero con aplicación foliar de nanopartículas de zinc, hierro y cobre

Oil sunflower production with foliar application of zinc, iron and copper nanoparticles

Patricio Apáez-Barrios¹ , Yurixhi Atenea Raya-Montaño^{2*} , Noé Armando Ávila-Ramírez¹ ,
Ma. del Carmen Rocha-Granados² 

¹Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Prolongación de la calle Mariano Jiménez s/n, Col. El Varillero, CP. 60670. Apatzingán, Michoacán, México.

²Facultad de Agrobiología "Presidente Juárez" de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Paseo Lázaro Cárdenas s/n, esq. Berlín, Colonia Viveros, CP. 60190. Uruapan, Michoacán, México.

*Autor de correspondencia: yurixhi@umich.mx

Artículo científico

Recibido: 09 de febrero 2025

Aceptado: 26 de enero 2026

RESUMEN. El girasol es una de las oleaginosas más importantes a nivel mundial y en México solo se produce el 7.5% del volumen que se consume, por lo que es necesario buscar alternativas para mejorar su producción. El suministro de nutrimentos como nanopartículas podría hacer más eficiente la asimilación en la planta y mejorar el rendimiento agrícola. El objetivo del presente estudio fue determinar el efecto de la aplicación foliar conjunta de nanopartículas de Zn+Fe+Cu a distintas dosis y número de aplicaciones sobre la producción de girasol. El 15 de febrero de 2023 se sembró girasol en suelo y bajo condiciones de riego. Los tratamientos consistieron en la aplicación conjunta de las nanopartículas Zn+Fe+Cu cada una a las dosis de 10 y 20 mg kg⁻¹ en dos, cuatro y seis aplicaciones foliares, lo que generó seis tratamientos más el testigo sin aplicación. Se encontró que, a excepción de la aplicación de las nanopartículas a 10 mg kg⁻¹ en dos aplicaciones, con todos los demás tratamientos se incrementó la producción de grano de girasol, el diámetro del tallo, el área del capítulo, el peso del capítulo, el índice de cosecha y la biomasa total. Fue más efectiva la dosis de 20 mg kg⁻¹ para mejorar el rendimiento de grano. La aplicación de 20 mg kg⁻¹ en cuatro aplicaciones generó el mayor rendimiento (3.61 t ha⁻¹) que representó 35% de incremento respecto al testigo. Por lo que es el tratamiento más apropiado para mejorar la producción de girasol.
Palabras clave: Biomasa total, dosis, *Helianthus annuus*, número de aplicaciones, rendimiento de grano.

ABSTRACT. Sunflower is one of the most important oilseeds worldwide and in Mexico only 7.5% of the volume consumed is produced, so it is necessary to look for alternatives to improve its production. The supply of nutrients such as nanoparticles could make assimilation in the plant more efficient and improve agricultural yield. The objective of the present study was to determine the effect of the joint foliar application of Zn+Fe+Cu nanoparticles at different doses and number of applications on sunflower production. On February 15, 2023, sunflower was sowing in soil and under irrigation conditions. The treatments consisted of the joint application of Zn+Fe+Cu nanoparticles each at doses of 10 and 20 mg kg⁻¹ in two, four and six foliar applications, which generated six treatments plus the control without application. It was found that, except for the applications of nanoparticles at 10 mg kg⁻¹ in two applications, with all other treatments, increased sunflower grain production, stem diameter, head area, head weight, harvest index and total biomass. The dose of 20 mg kg⁻¹ was more effective in improving grain yield. The application of 20 mg kg⁻¹ in four applications generated the highest yield (3.61 t ha⁻¹) which represented a 35% increase compared to the control. Therefore, it is the most appropriate treatment to improve sunflower production.

Keywords: Total biomass, doses, *Helianthus annuus*, number of applications, grain yield.

INTRODUCCIÓN

El girasol (*Helianthus annuus* L.) es originario del norte de América y se cultiva principalmente para la producción de semillas (Yegorov *et al.* 2019) usadas como botanas, ensaladas y para la producción de aceite; son fuente importante de lípidos insaturados, proteínas, antioxidantes como la vitamina E, folatos, niacina, fitonutrientes, calcio, cobre, hierro, manganeso, fósforo, selenio, magnesio y zinc (USDA 2020, Khurana y Singh 2021). A nivel mundial el girasol es una de las cuatro oleaginosas más importantes por volumen de producción de aceite junto con la soya (*Glicine max*), la palma (*Elaeis guineensis*) y la colza (*Brassica napus*) (Khurana y Singh 2021). El aceite de girasol es utilizado principalmente para cocinar y como materia prima en la industria de los alimentos, para la elaboración de margarinas, mantequilla, pan y aperitivos (Adeleke *et al.* 2020).

En México para el año 2024 el girasol se cultivó en 5 821 ha que produjeron 5 344 t, esta producción cubre alrededor del 8.1% del requerimiento nacional, que es completado con importaciones principalmente de Estados Unidos (47%), Argentina (35%) y Bulgaria (8.3%) (SE 2024, SIAP 2024). Esto hace dependiente a México de la producción extranjera, por lo que es necesario buscar alternativas para fomentar su producción nacional y satisfacer la demanda creciente de esta oleaginosa, debido al aumento poblacional (FAO 2017), en un contexto de agotamiento de suelos, agua y la fertilidad del suelo (Ditta *et al.* 2015). Actualmente el rendimiento de girasol en México es de 0.92 t ha⁻¹ (SIAP 2024), que podría incrementarse y hacer al cultivo más rentable y favorecer su producción. Dentro de las alternativas para mejorar la producción agrícola destaca la nutrición, que se suministra principalmente mediante fertilizantes inorgánicos, los cuales presentan bioconversión, volatilización y lixiviación, y tienen eficiencias de utilización del 10 al 60%, con el consecuente aumento en los costos de producción (Chhipa 2017, Zulfiqar *et al.* 2019) e impacto negativo en el ambiente, ya que contribuyen a la eutrofización y acidificación del agua, degradación y salinización de los suelos y emisión de gases con efecto invernadero (Skowrońska y Filipek 2014).

Esto hace necesario buscar alternativas más eficientes y con menor impacto ambiental (FAO 2017, Zulfiqar *et al.* 2019). En este sentido, la nanotecnología que se basa en el uso de materiales con tamaños de partículas de hasta 100 nm (Chhipa *et al.* 2017) está surgiendo como una alternativa que podría complementar la nutrición vegetal y representa pocos riesgos ambientales por las bajas dosis de aplicación que reducen la posibilidad de acumulación en el ecosistema (Atanda *et al.* 2025).

Existen nanopartículas de Au, CeO₂, TiO₂, SiO₂, y de nutrientes esenciales en la nutrición vegetal como el CuO, FeO y ZnO (Chhipa *et al.* 2017). El Cu es componente y activador de enzimas principalmente la superóxido dismutasa (SOD) y constituyente de la plastocianina. El Fe es componente de enzimas y es importante en la transferencia de electrones (reacciones redox) como en los citocromos y en las cadenas transportadoras de electrones, interviene en procesos como la fotosíntesis, respiración, reducción del nitrato y sulfatos, el Zn es componente esencial y activador de enzimas necesario en la biosíntesis de clorofila y ácido indolacético; necesario también en la síntesis de proteínas (Alcántar-González *et al.* 2016). Las plantas presentan deficiencias de estos micronutrientes en suelos con textura gruesa, pH alcalinos y pobres en materia orgánica (Wang *et al.* 2022).

En aplicaciones foliares de nanopartículas, se ha encontrado que las plantas pueden aumentar la eficiencia de absorción, como consecuencia de su pequeño tamaño, mayor solubilidad y adsorción (Morales-Díaz *et al.* 2017, Zulfiqar *et al.* 2019). Se han realizado estudios de aplicación individual de nanopartículas, principalmente de Zn, Cu y Fe a las dosis desde 5 hasta 1 000 mg kg⁻¹, con variación en la respuesta de las plantas en función del tipo de nanopartícula y la dosis. Pero en la mayoría de los casos se han encontrado efectos benéficos, por el incremento en el contenido de clorofilas (Parveen *et al.* 2016, Faizan *et al.* 2019, Singh *et al.* 2024), en la tasa fotosintética y en el rendimiento agronómico (Seleiman *et al.* 2020, Ahmed *et al.* 2021). Así mismo, existe evidencia que indica un efecto mayor en el rendimiento agrícola cuando se suministra de forma conjunta y foliar el Zn+Fe+Cu como nanopartículas (Olivarez-Rodríguez *et al.* 2024). En el cultivo de girasol son escasos los estudios al respecto, por lo que se planteó como objetivo determinar el efecto de la aplicación foliar conjunta de nanopartículas de Zn+Fe+Cu a distintas dosis y número de aplicaciones sobre la producción de girasol aceitero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del sitio experimental

El estudio se estableció en el campo experimental de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en Apatzingán, Michoacán. Que se encuentra en las coordenadas 19° 06' 00" LN y -102° 22' 00" LO, a 325 m de altitud. De clima BSh'g, cálido seco muy cálido (García 2004).

Establecimiento del cultivo

Se realizó la preparación del suelo, mediante un barbecho, dos pasos de rastra y el surcado a 80 cm de distancia entre surcos. Después se instaló el sistema de riego por goteo mediante la colocación de cintilla de 5/8", 1.01 LPH gotero⁻¹ y distancias entre goteros cada 10 cm. Posteriormente, se realizó un análisis físico y químico del suelo de 0 a 30 cm de profundidad, que determinó pH de 7.7 (alcalino), densidad aparente de 1.13 g cm⁻³, contenido de materia orgánica de 3.2%, capacidad de intercambio catiónico de 44 Cmol kg⁻¹, contenido (mg kg⁻¹) de N-NO₃ (20), P-Olsen (19), K (976), Ca (5454), Mg (1854), Zn (0.67), Cu (1.83) y de Fe (4.2). El genotipo utilizado fue girasol cultivar "Victoria" aceitero que fue sembrado el 15 de febrero de 2023 a distancias entre matas (sitios) de 0.6 m, dos plantas por sitio, lo que generó la densidad de población de 33 333 plantas ha⁻¹.

Riegos y fertilización

Debido a que el cultivo se estableció en el periodo de sequía, se realizaron riegos periódicos durante todo el ciclo del cultivo, a través de la cintilla, los lunes, miércoles y viernes, el tiempo de riego en cada aplicación fue de 2 h, lo que permitió tener al cultivo bajo condiciones de capacidad de campo y evitar condiciones de estrés. El agua utilizada provino de un pozo profundo que presenta conductividad eléctrica de 0.31 ds m⁻¹, pH de 7.17, contenido (mg L⁻¹) cloruros (15.5), bicarbonatos (161), nitratos (13.8), fosfatos (0.24), sulfatos (11.36), Na (7.73), K (1.27), Ca (14.4), Mg (29.5) y <0.05 de Fe, Zn, Cu, Mn y B. La fertilización de fondo se realizó con 80 y 80 kg ha⁻¹ de N y P₂O₅ como

urea (46 N) y fosfato diamónico (18 N – 46 P₂O₅). Se suministró la mitad del N y todo el P₂O₅ a los cinco días después de la emergencia (DDE) y la otra mitad del nitrógeno a los 30 DDE.

Tratamientos en estudio y diseño experimental

Se evaluó el suministro foliar de nanopartículas de manera conjunta a las dosis de 10-10-10 mg kg⁻¹ (D10) y 20-20-20 mg kg⁻¹ (D20) de ZnO, Fe₂O₃ y CuO, respectivamente en dos, cuatro y seis aplicaciones (A2, A4 y A6). La combinación de dosis y número de aplicaciones generó seis tratamientos (D10-A2, D10-A4, D10-A6, D20-A2, D20-A4, D20-A6), más el tratamiento testigo absoluto (D0-A0). Los tratamientos se distribuyeron en un diseño experimental de bloques completos al azar en arreglo de parcelas divididas, donde la parcela grande fue la dosis y la parcela chica correspondió al número de aplicaciones. En total se tuvieron 32 unidades experimentales, conformada cada una por tres surcos de 3 m de longitud. Las fuentes de nanopartículas utilizadas se obtuvieron de la empresa Sigma-Aldrich® con las siguientes características: en el caso del ZnO el tamaño de partícula fue de 67 nm y la concentración fue de 79.7%, el Fe₂O₃ con tamaño de partículas de 27 nm y concentración de 69.3%, en el CuO su tamaño de partícula fue de 40 nm y la concentración fue de 78.8%.

Las aplicaciones de los tratamientos iniciaron a los siete días después de la emergencia una vez por semana, por lo que las semanas utilizadas para completar el suministro de las nanopartículas correspondió al número de aplicaciones de cada tratamiento. Las nanopartículas fueron pesadas en una balanza analítica de precisión de 0.0001 g (PX224 PIONEER/OHAUS®) y la dilución fue en agua destilada. Para mejorar la absorción se adicionó el adherente Inex-A® a la dosis de 1 mL L⁻¹. El suministro foliar de las nanopartículas se hizo a punto de goteo entre las 7:30 y las 8:00 de la mañana con aspersores (318055 Pacto/SWISSMEX®) de 3 L de capacidad, se utilizó un aspersor por tratamiento. Las plantas del testigo fueron asperjadas solo con agua destilada más adherente. Durante cada aplicación de los tratamientos se utilizaron plásticos de 1.5 m de altura que se colocaron como barrea física para evitar efecto de deriva en las plantas. El gasto de solución de nanopartículas por planta en la primera aplicación fue de 15 mL por planta que se incrementó hasta 50 mL en la sexta aplicación.

Variables de respuesta

Al inicio de la floración, a los 45 días después de la siembra en seis plantas que conformaron la parcela útil de cada unidad experimental se registró la altura de la planta, medida con una cinta métrica desde la base del tallo hasta el inicio de la inflorescencia, el diámetro del tallo se registró con un vernier a 5 cm sobre la base del tallo y se contabilizó de forma visual el número de hojas completas por planta. A la madurez de cosecha se separaron los capítulos de girasol de las plantas de la parcela útil y se midió el diámetro de cada uno de ellos con una cintra métrica, posteriormente fueron desgranados los capítulos y en una báscula se pesaron los granos y el receptáculo. Con los resultados del peso de granos de las seis plantas de la parcela útil y la densidad de población se determinó el rendimiento de grano (t ha⁻¹).

Análisis estadístico

Los datos de las variables de respuesta se analizaron estadísticamente con el paquete computacional SAS, versión 9.4 y a las variables que presentaron diferencias estadísticas significativas, se les aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey con una probabilidad del error del 0.05 (SAS 2017).

Registro del clima y ocurrencia de fases fenológicas

Durante el ciclo del cultivo fueron registradas las temperaturas máximas y mínimas diarias con las cuales se determinaron los promedios decenales. Los datos fueron tomados de la estación agrometeorológica instalada en la Facultad de Ciencias Agropecuarias. La emergencia del girasol ocurrió a los cuatro días después de la siembra (dds), la floración a los 42 dds y la madurez fisiológica a los 67 dds. Las temperaturas máximas fueron de 35.4 a 38.6 °C, mientras que las mínimas presentaron valores de 16.1 a 19.7 °C. Las temperaturas menores se presentaron al inicio del ciclo del cultivo y posteriormente aumentaron, de tal manera que los valores mayores de temperaturas máximas y mínimas se presentaron en la segunda decena de abril, es decir, del 11 al 20 de abril, que correspondió al final del ciclo del cultivo (Tabla 1).

Tabla 1. Temperaturas máximas y mínimas (media decenal) ocurridas durante el ciclo del cultivo de girasol.

| Mes | Decena | Temperatura °C | | Mes | Decena | Temperatura °C | |
|---------|--------|----------------|--------|-------|--------|----------------|--------|
| | | Máxima | Mínima | | | Máxima | Mínima |
| Febrero | 2 | 35.4 | 16.1 | Marzo | 3 | 37.5 | 17.2 |
| Febrero | 3 | 35.5 | 16.8 | Abril | 1 | 37.8 | 19.0 |
| Marzo | 1 | 35.5 | 18.4 | Abril | 2 | 38.6 | 19.7 |
| Marzo | 2 | 35.8 | 17.6 | - | - | - | - |

RESULTADOS

Ninguno de los tratamientos tuvieron cambios estadísticos significativos en la altura de la planta ni en la cantidad de hojas por planta, pero de manera general, la aplicación de nanopartículas favoreció el aumento del diámetro del tallo de las plantas de girasol desde 10 hasta 27%. Las plantas que presentaron el diámetro de tallo mayor fueron a las que se suministraron cuatro veces las nanopartículas a la dosis de 20 mg kg⁻¹, al presentar tallos 0.65 cm más gruesos (Tabla 2).

La aplicación de las nanopartículas Zn+Fe+Cu con la mayoría de los tratamientos favorecieron el aumento en el rendimiento de grano de girasol a acepción del suministro a la dosis de 10 mg kg⁻¹ en dos aplicaciones, tratamiento con el que las plantas presentaron similar rendimiento de grano que las plantas del testigo absoluto. El suministro conjunto de nanopartículas cada una a 20 mg kg⁻¹ fue más efectivo para aumentar el rendimiento de grano en comparación con la dosis de 10 mg kg⁻¹. El incremento en el rendimiento de grano no fue proporcional al número de aplicaciones, ya que, con cuatro y seis aplicaciones para una misma dosis, las plantas presentaron similar rendimiento de grano. Aunque, el suministro foliar de las nanopartículas a la dosis de 20 mg kg⁻¹ en cuatro y seis aplicaciones logró los incrementos mayores en el rendimiento de grano, que fueron

de 35 y 28%, respectivamente; en comparación con las plantas del testigo absoluto sin aplicación. Por lo que, con 20 mg kg⁻¹ suministradas cuatro veces es el tratamiento más apropiado para favorecer más la producción de girasol con un gasto de producto de \$2 160 ha⁻¹ (Figura 1).

Tabla 2. Nivel de significancia y prueba complementaria de la altura de la planta, diámetro del tallo y número de hojas del girasol con aplicación de nanopartículas de Zn+Fe+Cu.

| Dosis mg kg ⁻¹ | No. aplicaciones | Altura de la planta cm | Diámetro del tallo cm | Número de hojas No./planta |
|-----------------------------|------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 0 | 0 | 167.50 ± 15.8 ^{a†} | 2.40 ± 0.08 ^c | 26.83 ± 2.72 ^a |
| 10 | 2 | 180.13 ± 18.1 ^a | 2.63 ± 0.15 ^{bc} | 24.50 ± 2.38 ^a |
| 10 | 4 | 173.38 ± 13.4 ^a | 2.63 ± 0.20 ^{bc} | 25.00 ± 2.61 ^a |
| 10 | 6 | 189.50 ± 5.3 ^a | 2.75 ± 0.21 ^{abc} | 27.00 ± 1.47 ^a |
| 20 | 2 | 185.50 ± 8.3 ^a | 2.61 ± 0.08 ^{bc} | 27.63 ± 2.50 ^a |
| 20 | 4 | 191.00 ± 11.2 ^a | 3.05 ± 0.23 ^a | 26.50 ± 2.38 ^a |
| 20 | 6 | 188.25 ± 7.1 ^a | 2.84 ± 0.14 ^{ab} | 27.38 ± 1.80 ^a |
| Media | | 182.18 | 2.70 | 26.40 |
| Prob. F | | NS | ** | NS |
| DMSH _{0.05} | | 24.032 | 0.376 | 4.595 |
| Coefficiente de variación % | | 8.65 | 6.96 | 7.45 |

† = medias con letras distintas en cada columna difieren estadísticamente (Tukey, p ≤ 0.05). ** p ≤ 0.01. NS = no significativo. DMSH_{0.05} = diferencia mínima significativa honesta.

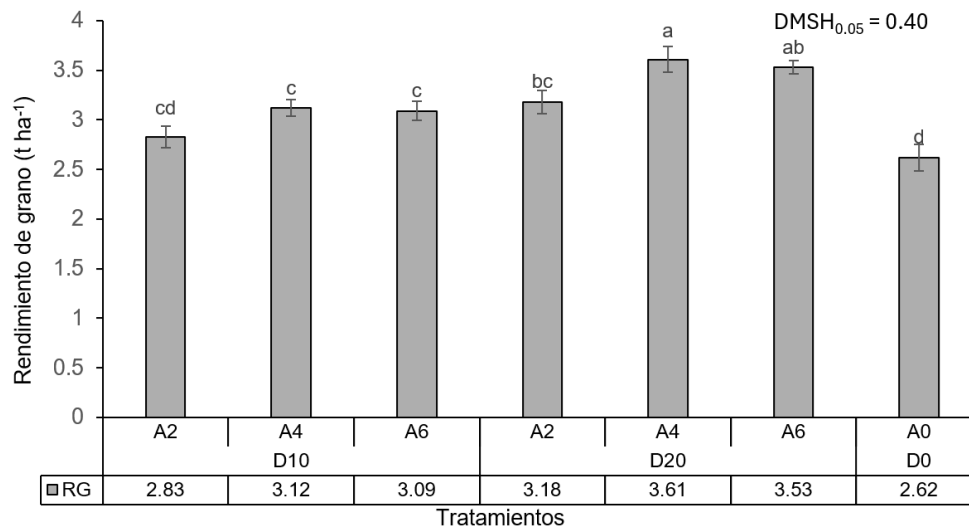


Figura 1. Rendimiento de grano (RG) de girasol con aplicación de nanopartículas a distintas concentraciones y número de aplicaciones. DMSH_{0.05} = diferencia mínima significativa honesta. A = número de aplicaciones, D = dosis en mg kg⁻¹.

Además de la respuesta positiva del suministro de nanopartículas sobre el rendimiento de grano, también con la mayoría de los tratamientos de nanopartículas las plantas aumentaron el área del capítulo, el peso del receptáculo, el índice de cosecha y la biomasa total. A excepción del tratamiento de 10 mg kg⁻¹ suministradas dos veces, con todos los otros tratamientos las plantas lograron capítulos de mayores áreas. Con relación al peso del capítulo, fue con 10 mg kg⁻¹ suministradas en dos y seis aplicaciones los tratamientos con los que las plantas presentaron

similares valores respecto a las plantas del testigo sin aplicación, mientras que con todos los otros tratamientos se mejoró esta variable de respuesta. Así mismo, similar índice de cosecha respecto al testigo se registró con 10 y 20 mg kg⁻¹, ambas dosis en dos aplicaciones. Mientras que las plantas que presentaron aumentos significativos en la biomasa total fueron las que recibieron 20 mg kg⁻¹ en cualquier número de aplicaciones (Tabla 3).

Tabla 3. Nivel de significancia y prueba de comparación de medias del diámetro del capítulo, peso de granos, peso del receptáculo y peso de cien granos de girasol con aplicación de nanopartículas a distintas dosis y número de aplicaciones.

| Dosis mg kg ⁻¹ | No. aplicaciones | Área del capítulo cm ² | Peso de capítulo g | Índice de cosecha % | Biomasa total g m ⁻² |
|----------------------------|------------------|-----------------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| 0 | 0 | 185.6 ± 8.9 ^{e1} | 350 ± 29.7 ^c | 24.7 ± 0.6 ^b | 1007.5 ± 65 ^c |
| 10 | 2 | 200.9 ± 10.8 ^{bc} | 387 ± 19.1 ^{bc} | 25.0 ± 1.0 ^b | 1134.8 ± 63 ^{bc} |
| 10 | 4 | 223.7 ± 15.4 ^b | 432 ± 27.1 ^b | 28.0 ± 1.0 ^a | 1113.8 ± 62 ^{bc} |
| 10 | 6 | 216.6 ± 18.1 ^b | 402 ± 7.6 ^{bc} | 28.7 ± 0.6 ^a | 1077.7 ± 40 ^c |
| 20 | 2 | 218.9 ± 16.5 ^b | 434 ± 16.7 ^b | 24.0 ± 1.0 ^b | 1340.6 ± 52 ^a |
| 20 | 4 | 264.9 ± 14.7 ^a | 533 ± 10.1 ^a | 28.0 ± 1.0 ^a | 1291.7 ± 94 ^{ab} |
| 20 | 6 | 259.3 ± 16.5 ^a | 538 ± 29.9 ^a | 27.7 ± 0.7 ^a | 1276.3 ± 36 ^{ab} |
| Media | | 224.3 | 439.7 | 26.6 | 1183.7 |
| Prob. F | | ** | ** | ** | ** |
| DMSH _{0.05} | | 27.2 | 61.8 | 2.57 | 186.4 |
| Coeficiente de variación % | | 8.9 | 9.8 | 9.5 | 10.7 |

¹ = medias con letras distintas en cada columna difieren estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$). ** $p \leq 0.01$. NS = no significativo. DMSH_{0.05} = diferencia mínima significativa honesta.

Por lo que el mayor rendimiento de grano en las plantas con suministro de 20 mg kg⁻¹ en cuatro y seis aplicaciones fue consecuencia de que produjeron los capítulos con mayor área y peso. Así mismo, estas plantas presentaron de los mayores índices de cosecha y biomasa total (Tabla 3). A pesar de que la altura de la planta no se incrementó, ni tampoco el número de hojas, pero si se mejoró el diámetro del tallo, lo que pudo haber contribuido al vigor de la planta con la aplicación de las nanopartículas (Tabla 2).

DISCUSIÓN

La respuesta positiva de la aplicación de nanopartículas de Zu+Cu+Fe se puede atribuir a que son micronutrientes esenciales de las plantas, requeridos a concentraciones aproximadas de 100 mg kg⁻¹, necesarios para procesos metabólicos principalmente como nutrientes funcionales y que en tamaño de nanopartículas mejoran su biodisponibilidad y aumentar el aprovechamiento por las plantas (Morales-Díaz *et al.* 2017). Su pequeño tamaño (<100 nm) incrementa su eficiencia para entrar y translocarse en la planta, debido a su gran relación superficie por volumen en comparación con las fuentes convencionales (fertilizantes) ampliamente utilizados. Las nanopartículas ingresan al espacio intercelular vía apoplasto y se mueven desde la epidermis a la endodermis, donde se acumulan uniformemente y forman agregados (Ahmed *et al.* 2021). También se propone la unión de las nanopartículas con proteínas transportadoras útil para la internalización celular lo que facilita el movimiento a través de los canales iónicos, acuaporinas y endocitosis (Rico *et al.* 2011).

Se consideran a los materiales en tamaño de nanopartícula más eficientes que las fuentes convencionales. Al respecto, la aplicación foliar de ZnO en tamaños mayores a las nanopartículas fue más limitado su aprovechamiento y traslocación en el cultivo de girasol (Li *et al.* 2019) en comparación con el Zn en nanopartícula, esta última presentó mayor estabilidad y mejoró sus efectos positivos sobre las plantas, además reduce su toxicidad potencial (Šebesta *et al.* 2021). Por lo que este estudio a pesar de que en seis aplicaciones se suministraron en total 120 mg kg⁻¹ de cada uno de los elementos, se lograron rendimientos de grano mayores a los de las plantas del testigo. Esta respuesta puede explicarse por las condiciones edáficas del sitio experimental, donde el suelo presentó un pH de 7.7, valor que de acuerdo con Sturikova *et al.* (2018) limita la disponibilidad de Zn, Cu y Fe. A ello se suman los bajos contenidos iniciales de estos micronutrientes en el suelo (0.67, 1.83 y 4.2 mg kg⁻¹ para Zn, Cu y Fe, respectivamente), y en el agua de riego (<0.05 mg L⁻¹). En este contexto, la aplicación foliar de las nanopartículas Zn, Cu y Fe resultó determinante para incrementar la producción de girasol.

El rendimiento de grano obtenido en las plantas con suministro de 20 mg kg⁻¹ de las tres nanopartículas en cuatro aplicaciones (3.61 t ha⁻¹), es superior al rendimiento máximo (3.5 t ha⁻¹) encontrado por Arenas-Julio *et al.* (2021) en girasol cultivar victoria establecido bajo condiciones de lluvia estacional, con manejo de la nutrición con base en fertilización química y establecido en condiciones de clima árido con temperaturas máximas durante el ciclo del cultivo de 21 a 31 °C, que de acuerdo con Escalante-Estrada *et al.* (2015) son temperaturas más apropiadas para el girasol que las del presente estudio. También, Arenas-Julio *et al.* (2021) registraron ciclo de cultivo de 130 días con 100 kg ha⁻¹ de N. Mientras que, en este estudio, las temperaturas máximas ocurridas en el sitio de estudio variaron de 35.4 a 38.6 °C, el ciclo del cultivo fue de 67 días y se suministraron solo 80 kg ha⁻¹ de N. Esto indica que las nanopartículas pueden ser una opción adecuada para lograr aumentar el rendimiento de grano de girasol aun en condiciones de temperaturas elevadas, por arriba de las temperaturas recomendadas para el cultivo de girasol, con ciclos de cultivo cortos y menor aporte de fertilización nitrogenada. Sobre lo mismo, Morales-Díaz *et al.* (2017) reportan que elementos químicos como Zn incrementan la expresión génica relacionada con tolerancia al estrés. Lo anterior, puede explicar que bajo condiciones de temperaturas elevadas que en algunos días alcanzaron los 40 °C, el aporte conjunto de nanopartículas pudo haber contribuido a la reducción del estrés en la planta, disminuyendo el gasto de energía, incrementando la fotosintética y, en consecuencia, mejorando el rendimiento de grano. Resultados positivos de la aplicación de nanopartículas de Zn, Fe y Cu también se han encontrado en cultivos de diversas familias como las solanáceas, gramíneas, aliáceas y cucurbitáceas con dosis desde 5 hasta 100 mg kg⁻¹ en función del cultivo (Zulfiqar *et al.* 2019) aunque en todos estos estudios las nanopartículas fueron evaluadas de forma individual, lo que puede explicar la respuesta que en algunas ocasiones ocurren con dosis altas como en leguminosas que requirieron 100 mg kg⁻¹ de Fe para lograr la mejor respuesta en el rendimiento de grano (Palchoudhury *et al.* 2018). En este estudio fue menor la dosis de Fe suministrada y mostró mejoras en la producción, pero fue acompañado con el Cu y Zn en todas las aplicaciones, lo que pudo potencializar la respuesta como se evidenció también en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) por Olivarez-Rodríguez *et al.* (2024), quienes, con el suministro individual de nanopartículas de Zn, Cu, Fe aplicadas a 10 mg kg⁻¹ no encontraron mejora en el rendimiento. Pero al suministrar de forma conjunta estos tres nutrientes lograron mejorar el rendimiento, reportando que con la aplicación de nanopartículas de Zn+Cu+Fe en dosis de 10 mg kg⁻¹ con siete aplicaciones

incrementaron un 68% el rendimiento de fruto, que fue mayor al aumento en el rendimiento de grano de girasol de 18% cuando se aplicaron las tres nanopartículas a 10 mg kg⁻¹ con seis aplicaciones, y con la dosis de 20 mg kg⁻¹ en cuatro aplicaciones, lo que indica diferencias en requerimiento y respuesta entre especies de plantas.

Por otra parte, el rendimiento de grano obtenido con la aplicación de 10 mg kg⁻¹ de nanopartículas en cuatro y seis aplicaciones y 20 mg kg⁻¹ en cualquier número de aplicaciones evaluado superan al rendimiento de grano promedio nacional del 235 al 292% que, de acuerdo con el SIAP (2024) es de 0.92 t ha⁻¹, esto indica que la aplicación de nanopartículas son una alternativa eficaz para mejorar el rendimiento y hacer más atractiva la siembra de este cultivo y con ello contribuir a reducir en México el déficit de oleaginosas.

CONCLUSIONES

Con 10 mg kg⁻¹ de nanopartículas de Zn+Fe+Cu en cuatro y seis aplicaciones, así como con 20 mg kg⁻¹ en dos, cuatro y seis aplicaciones, se incrementa el rendimiento de grano, área y peso del capítulo del girasol. El suministro de nanopartículas también mejoró el diámetro del tallo, el índice de cosecha y la biomasa total de girasol, principalmente con la dosis alta. El suministro foliar de 20 mg kg⁻¹ de nanopartículas en cuatro aplicaciones generó el mayor rendimiento de grano, e incrementos en el diámetro del tallo, área foliar, peso de capítulo, índice de cosecha y biomasa total. Por lo que es una alternativa para mejorar la producción de este cultivo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por el apoyo económico otorgado del proyecto aprobado en el año 2022.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen conflicto de interés.

LITERATURA CITADA

- Adeleke BS, Babalola, OO (2020) Oilseed crop sunflower (*Helianthus annuus*) as a source of food: Nutritional and health benefits. *Food Science & Nutrition* 8(9): 4666-4684. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1783>
- Ahmed R, Abd-Samad MY, Kamal-Uddin M, Abdul-Quddus A (2021) Recent trends in the foliar spraying of zinc nutrient in tomato production. *Agronomy* 11(10): 2074. <https://doi.org/10.3390/agronomy11102074>
- Alcántar-González G, Trejo-Téllez LT, Gómez-Merino FC (2016) Nutrición de cultivos. Segunda edición. Editorial del Colegio de Postgraduados, Texcoco Edo. de México. 443p.

- Arenas-Julio YR, Escalante-Estrada JAS, Ortiz-Solorio CAO, Volke-Haller V, Rodríguez-González MT, Aguilar-Carpio C (2021) Producción de girasol en función del tipo de suelo, nitrógeno y densidad de población. *Acta Agrícola y Pecuaria* 7(1): 1-11. <https://doi.org/10.30973/aap/2021.7.0071008>
- Atanda SA, Shaibu RO, Agunbiade FO (2025) Nanoparticles in agriculture: balancing food security and environmental sustainability. *Discover Agriculture* 3(1): 26. <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00159-x>
- Chhipa H (2017) Nanofertilizers and nanopesticides for agriculture. *Environmental chemistry letters* 15(1): 15-22. <https://doi.org/10.1007/s10311-016-0600-4>
- Ditta A, Arshad M, Ibrahim M (2015) Nanoparticles in sustainable agricultural crop production: Applications and perspectives. In: Siddiqui M, Al-Whaibi M, Mohammad FMH (eds) *Nanotechnology and plant sciences*. Springer Cham. Switzerland. pp. 55-75. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14502-0_4
- Escalante-Estrada JAS, Rodríguez-González MT, Escalante-Estrada YI (2015) Fenología, biomasa y rendimiento de cultivares de girasol en Valles Altos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2: 307-311.
- Faizan M, Hayat S (2019) Effect of foliar spray of ZnO-NPs on the physiological parameters and antioxidant systems of *Lycopersicon esculentum*. *Polish Journal of Natural Sciences* 34(6): 87-105.
- FAO (2017) The future of food and agriculture – Trends and challenges. Rome. Italy. <https://www.fao.org/3/i6583e/i6583e.pdf>. Fecha de consulta: 09 de mayo de 2024.
- García E (2004) Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 90p
- Khurana S, Singh R (2021) Sunflower (*Helianthus annuus*) Seed. In: Tanwar B, Goyal A (eds) *Oilseeds: Health attributes and food applications*. Springer, Singapore. pp. 123-143. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4194-0_5.
- Li C, Wang P, Van-Der-Ent A, Cheng M, Jiang H, Lund-Read T, Kopittke PM (2019) Absorption of foliar-applied Zn in sunflower (*Helianthus annuus*): Importance of the cuticle, stomata and trichomes. *Annals of Botany* 123(1): 57-68.
- Morales-Díaz AB, Ortega-Ortiz H, Juárez-Maldonado A, Cadenas-Pliego, G, González-Morales S, Benavides-Mendoza A (2017) Application of nanoelements in plant nutrition and its impact in ecosystems. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology* 8(1): <https://doi.org/013001.10.1088/2043-6254/8/1/013001/meta>
- Olivarez-Rodríguez JM, Apáez-Barrios P, Raya-Montaña YA, Apáez-Barrios M (2024) Producción de tomate bajo condiciones protegidas con aplicaciones foliares de nanopartículas metálicas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 15(3): e3667-e3667. <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i3.3667>
- Palchoudhury S, Jungjohann KL, Weerasena L, Arabshahi A, Gharge U, Albattah A, Holler RA (2018) Enhanced legume root growth with pre-soaking in α -Fe₂O₃ nanoparticle fertilizer. *RSC advances* 8(43): 24075-24083. <https://doi.org/10.1039/c8ra04680h>
- Parveen A, Mazhari BBZ, Rao S (2016) Impact of bio-nanogold on seed germination and seedling growth in *Pennisetum glaucum*. *Enzyme Microbial Technology* 95: 107–111. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2016.04.005>
- Rico CM, Majumdar S, Duarte-Gardea M, Peralta-Videa JR, Gardea-Torresdey JL (2011) Interaction of nanoparticles with edible plants and their possible implications in the food chain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 59: 3485-3498. <https://doi.org/10.1021/jf104517j>
- SAS (2017) SAS/STAT User's guide, version 9.4. SAS Institute Inc. North Caroline, USA.
- SE (2024) Semillas de girasol, incluso quebrantadas: Intercambio comercial, compras y ventas internacionales, mercado y especialización. Data México. Secretaría de Economía. <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/product/sunflower-seeds-whether-or-not-broken>. Fecha de consulta: 11 de septiembre de 2025.

- Šebesta M, Kolenčík M, Sunil BR, Illa R, Mosnáček J, Ingle AP, Urík M (2021) Field application of ZnO and TiO₂ nanoparticles on agricultural plants. *Agronomy* 11(11): 2281. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112281>
- Seleiman MF, Almutairi KF, Alotaibi M, Shami A, Alhammad BA, Battaglia ML (2020) Nano-fertilization as an emerging fertilization technique: Why can modern agriculture benefit from Its use. *Plants* 10(2). <https://doi.org/10.3390/plants10010002>
- SIAP (2024) Cierre de la producción agrícola 2024. Secretaria de Agricultura y Desarrollo Regional. Disponible en: https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/. Fecha de consulta: 11 de septiembre de 2025.
- Skowrońska M, Filipek T (2014) Life cycle assessment of fertilizers: a review. *International Agrophysics* 28(1): <https://doi.org/10.110.10.2478/intag-2013-0032>
- Singh A, Sharma A, Singh O, Rajput VD, Movsesyan H, Minkina T, Ghazaryan K (2024) In-depth exploration of nanoparticles for enhanced nutrient use efficiency and abiotic stresses management: present insights and future horizons. *Plant Stress* 14: 100576. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100576>
- Sturikova H, Krystofova O, Huska D, Adam V (2018) Zinc, zinc nanoparticles and plants. *Journal of Hazardous Materials* 349: 101-110. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.01.040>
- USDA (2020) Oilseeds: World market and trade. <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/oilseeds.pdf>. Fecha de consulta: 02 de abril de 2024.
- Wang S, Xu L, Hao M (2022) Impacts of long-term micronutrient fertilizer application on soil properties and micronutrient availability. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19(23): 16358. <https://doi.org/10.3390/ijerph192316358>
- Yegorov B, Turpurova T, Sharabaeva E, Bondar Y (2019) Prospects of using by-products of sunflower oil production in compound feed industry. *Journal of Food Science Technology Ukraine* 13: 106–113. <https://doi.org/10.15673/fst.v13i1.1337>
- Zulfiqar F, Navarro M, Ashraf M, Akram NA, Munné-Bosch S (2019) Nanofertilizer use for sustainable agriculture: Advantages and limitations. *Plant Science* 289: 110270. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110270>