








Fertilización foliar con nanopartículas de ZnO y su efecto en la producción, calidad biofísica y nutraceútica en frutos de nogal pecanero (*Carya illinoensis*)

Foliar fertilization with ZnO nanoparticles and its effect on production, biophysical and nutraceutical quality of pecan nuts (*Carya illinoensis*)

Karla Lucero Estrada-Arellano¹ , Cirilo Vázquez-Vázquez^{1*} , Rebeca Betancourt-Galindo² ,
María Dolores Muy-Rangel³ , Luis Manuel Valenzuela-Nuñez⁴ ,
José Luis García-Hernández¹  y Miguel Ángel Gallegos-Robles¹ 

¹ Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Agricultura y Zootecnia. Carretera Gómez Palacio-Tlahualilillo km 32, Ejido Venecia. 35111 Gómez Palacio, Durango, México.

* Autor para correspondencia (cirvaz60@hotmail.com)

² Centro de Investigación de Química Aplicada. Enrique Reyna H. 140, San José de los Cerritos. 25294 Saltillo, Coahuila, México.

³ Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C. Carretera El Dorado km 5.5, Campo El Diez. 80110 Culiacán Rosales, Sinaloa, México

⁴ Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Ciencias Biológicas, Laboratorio de Biología y Ecología Forestal. Av. Universidad s/n. Fraccionamiento Filadelfia. 35010 Gómez Palacio, Durango, México.

Editor de Sección: Dr. Luis Hernández Adame

RESUMEN

El nogal pecanero (*Carya illinoensis*) es uno de los cultivos más importantes de la Comarca Lagunera. La deficiencia de zinc (Zn) es uno de los principales problemas que limitan su productividad. La nanotecnología incluye materiales nutrimentales con los que se pueden sustituir fertilizantes convencionales con variado efecto en rendimiento, calidad biofísica y nutraceútica en el fruto. Los efectos de la aplicación foliar de nanopartículas de ZnO en nogal pecanero variedad Western fueron evaluados mediante dosis de Zn con los siguientes tratamientos: control, 4000 (ZnSO₄), 2000 (nps ZnO), y 4000 (nps ZnO) mg L⁻¹. El diseño experimental fue en bloques al azar con cuatro repeticiones. Las variables evaluadas en fruto y árbol fueron: rendimiento, número de nueces kg⁻¹, largo y ancho de nuez, concentración de Zn en foliolos, ácidos grasos, proteína cruda, porcentaje de grasa y humedad. Se observó diferencia significativa en rendimiento y nivel de Zn en los foliolos, donde el mejor tratamiento fue 4000 mg L⁻¹ de nanopartículas de ZnO, mientras que para la variable largo de nuez se observó diferencia significativa, siendo inferior el tratamiento de 4000 mg L⁻¹ de ZnSO₄. En las variables nutraceúticas, el contenido de ácidos grasos evaluado mediante el contenido de grasas saturadas (C16:0 y C18:0) mostró cambios altamente significativos, siendo el tratamiento con la dosis de 4000 mg L⁻¹ de nanopartículas el que tuvo mayor porcentaje. Los ácidos grasos insaturados (C18:1 y C18:3) mostraron diferencias significativas, siendo los tratamientos evaluados con nanopartículas los que tuvieron un porcentaje inferior. El contenido de proteína también mostró diferencias altamente significativas, siendo el tratamiento control y el químico a base de ZnSO₄ los tratamientos superiores. Las nanopartículas pueden ser usadas para mejorar el rendimiento y abastecer el contenido de Zn al cultivo, pero la calidad de fruto se ve afectada desde el punto de vista nutricional.

Palabras clave: ácidos grasos, cultivares de nuez, óxido de zinc, proteína cruda, rendimiento.

SUMMARY

Pecan tree is one of the most important crops in the Comarca Lagunera. Zinc (Zn) deficiency is one of the main problems that limit its productivity. Nanotechnology includes nutrimental materials, which may substitute conventional fertilizers with



Cita recomendada:

Estrada-Arellano, K. L., Vázquez-Vázquez, C., Betancourt-Galindo, R., Muy-Rangel, M. D., Valenzuela-Nuñez, L. M., García Hernández, J. L., & Gallegos-Robles, M. A. (2023). Fertilización foliar con nanopartículas de ZnO y su efecto en la producción, calidad biofísica y nutraceútica en frutos de nogal pecanero (*Carya illinoensis*). *Terra Latinoamericana*, 41, 1-12. e1585. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1585>

Recibido: 23 de mayo de 2022.

Aceptado: 6 de marzo de 2023.

Artículo. Volumen 41.

Julio de 2023.

diverse effects on yield, and biophysical and nutraceutical quality in fruits. The effects of foliar application of ZnO nanoparticles on pecan trees (Western variety) were evaluated through the following treatments: control, 4000 (ZnSO₄), 2000 (nps ZnO), 4000 (nps ZnO) mg L⁻¹. The experimental design was randomized blocks with four replications. Variables evaluated in fruit and tree were the following: yield, number of nuts kg⁻¹, length and width of the nut, concentration of Zn in leaflets, fatty acids, crude protein, percentage of fat and moisture. A significant difference was observed in yield and Zn level in the leaflets, where the best treatment was 4000 mg L⁻¹ of ZnO nanoparticles, while for length of fruit a significant difference was observed, being the 4000 mg L⁻¹ of ZnSO₄ treatment the lowest value. About nutraceutical variables, the content of fatty acids evaluated by the content of saturated fats (C16:0 and C18:0) showed highly significant changes, being the treatment with the dose of 4000 mg L⁻¹ of nanoparticles the one with the highest percentage. Unsaturated fatty acids (C18:1 and C18:3) showed significant differences, where the treatments evaluated with nanoparticles were the ones with a lower percentage. Protein content also showed highly significant differences, being the control treatment and the chemical based on ZnSO₄ the higher treatments. Nanoparticles can be used to improve yield and supply Zn content to the crop, but fruit quality is affected from a nutritional point of view.

Index words: fat acids, walnut cultivars, zinc oxide, crude protein, yield.

INTRODUCCIÓN

El nogal pecanero (*Carya illinoensis*) produce uno de los frutos secos más importantes en el mundo (Zhang, Peng y Li, 2015). La superficie cosechada de este cultivo ha mostrado tendencia positiva por los principales países productores del mundo (China, Irán, Estados Unidos, Turquía y México) con rango entre 96 909 y 390 924 ha (FAO, 2018; Cruz-Álvarez *et al.*, 2020). México es el cuarto productor mundial de nueces de nogal pecanero con una producción de 164 652 toneladas y sus principales estados productores son Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León y Sonora (SIAP, 2021). Sin embargo, los suelos en estas entidades se caracterizan por tener un alto contenido de carbonatos y pH alcalino, lo que limita la biodisponibilidad de algunos nutrientes, especialmente los micronutrientes (Vargas-Piedra y Arreola, 2008; Hernández-López *et al.*, 2020). El Zinc está disponible en suelos con valores de pH de 5-6 unidades. En pH más alto forma compuestos escasamente solubles (Castillo-González *et al.*, 2018).

El cultivo del nogal demanda altos suministros de Zn (Wood y Payne, 1997; Hernández-López *et al.*, 2020). Este micronutriente en el nogal participa de manera importante en el crecimiento, desarrollo, metabolismo y la biosíntesis de los componentes de la almendra con propiedades biocéuticas (Wang *et al.*, 2020). La consecuencia de una deficiencia severa de este micronutriente causa una reducción de hasta un 57% de la producción (Castillo-González *et al.*, 2019). Por eso, el manejo de la nutrición es de suma importancia para obtener altos rendimientos (Hernández-López *et al.*, 2020).

El desarrollo de la nanotecnología en la agricultura se ha incrementado a nivel mundial en el siglo veintiuno (Shojaei *et al.*, 2019) y se prevé que esta innovación pueda proporcionar soluciones sostenibles, al reemplazar los fertilizantes a granel tradicionales con nanopartículas que dispongan propiedades superiores (Achari y Kowshik, 2018). Las nanopartículas de diferentes óxidos metálicos pueden desempeñar un papel importante para promover el crecimiento y el rendimiento de las plantas (Sabir, Arshad y Chaundhari, 2014), entre estos materiales, ha habido un creciente interés en la aplicación de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) (Dimkpa, White, Elmer y Gardea, 2017; Rizwan *et al.*, 2019; Ali *et al.*, 2019).

Las nanopartículas están siendo estudiadas globalmente por su potencial agrícola como promotores de crecimiento, nanofertilizantes y antimicrobiales (Méndez-Arguello *et al.*, 2016). Estos nanomateriales podrían ser una posible alternativa a los fertilizantes, y para superar los problemas de deficiencia en el suelo debido a la falta de disponibilidad de Zn (Sabir *et al.*, 2020). Aunque se ha informado el efecto benéfico de las nanopartículas de ZnO en cultivos como el café (*Coffea arabica* L.) (Rossi, Fadenia, Sharifan, Ma y Lombardini, 2019), chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) (García-López *et al.*, 2018), olivo (*Olea europaea* L.) (Genaidy, Abd-Alhamid, Hassan, Hassan y Hagagg, 2020), y tomate (*Solanum lycopersicum* L.) (Faizan, Faraz y Hayat, 2020); no se han publicado estudios que describan la interacción de este nanomaterial en el cultivo del nogal pecanero. Por lo anterior, el objetivo fue evaluar el efecto de las nanopartículas como fuente de fertilización foliar a los árboles de nogal pecanero y su efecto en algunas propiedades bioquímicas del fruto.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del Área de Estudio

El estudio se realizó en una huerta ubicada en el ejido Venecia del municipio de Gómez Palacio, Durango, México (25.753611 N y 103.351944 O). En esta área el clima es árido, con escasas lluvias durante todo el año. Presenta una precipitación media anual de 224.6 mm y 38% de humedad relativa. La temperatura oscila entre los 28 y 40 °C, pero puede alcanzar hasta 48 °C en verano y -8 °C en invierno. La temperatura media anual es de 21.11 °C (Vargas-González, Álvarez, Guigón, Cano y García, 2019). El experimento se estableció en un suelo grupo Xerosol con las siguientes características: textura franca arcillo-arenoso (54.4% arena, 22% limo y 23.6% arcilla), pH de 7.8, 1.07% de materia orgánica y 1.0 dS m⁻¹ de conductividad eléctrica.

Manejo de la Huerta

Durante un año se evaluaron árboles de nogal variedad Western de 23 años de edad. Los árboles utilizados no recibieron ningún tratamiento previo de Zn. El riego de la huerta fue por gravedad, con cuatro riegos anuales con una lámina de riego total de 120 cm al año. Se realizó una fertilización de suelo con la fórmula (120-60-00) usando como fuentes de nitrógeno y fosforo, urea (46% N) y el fosfato monoamónico (12% N y 60 P₂O₅).

Tratamientos y Aplicación de Nanopartículas de ZnO

Las nanopartículas de ZnO utilizadas se obtuvieron en el Centro de Investigación de Química Aplicada, Departamento de Materiales Avanzados, Saltillo, México. La morfología y caracterización estructural del nanomaterial utilizado en este estudio fue reportado previamente por Betancourt-Galindo, Berlanga, Puente, Rodríguez y Sánchez (2010). Las nanopartículas usadas fueron predominantemente de forma hexagonal con un tamaño promedio de 60 nanómetros.

Se prepararon soluciones madre agregando las siguientes concentraciones totales de sulfato de zinc (ZnSO₄) y nanopartículas de óxido de zinc (ZnO): T₁ = control 0, T₂ = 4000 (ZnSO₄), T₃ = 2000 (nps ZnO), T₄ = 4000 (nps ZnO) mg L⁻¹. Las nanopartículas se dispersaron por un sonicador (SONICS modelo VC505). Para su posterior disolución proporcional en 5 L aplicados en aspersiones por árbol. Al no existir reportes previos de dosis aplicadas de nanopartículas en nogal se tomó como referencia las usadas en el árbol de granada por Davarpanah, Tehranifar, Davarynejad, Abadia y Khorasani (2016).

Se realizaron dos aplicaciones en la temporada, una en la etapa de crecimiento vegetativo y otra en pleno llenado de almendra, con una bomba de aspersión motorizada marca Swissmex® AM162.

Rendimiento, Número de Nueces kg⁻¹, Largo y Ancho de Fruto

La cosecha se realizó de manera manual durante la cuarta semana de octubre del año 2019. Se recogieron las nueces para retirar el ruezno y luego proceder al pesado con una báscula colgante de resorte (Nuevo León®) para obtener el rendimiento en kg árbol⁻¹. La variable de número de nueces se realizó recolectando un kg de nuez y contando el número de nueces presentes (Sánchez *et al.*, 2009). Para medir largo y ancho de la nuez se utilizó un vernier milimétrico electrónico (Leidsany®) evaluándose 20 nueces por árbol.

Asimilación de Zn en Hojas

Después del mes de cada aplicación, se realizó un muestreo de hojas para su análisis. Para ello, de cada árbol se seleccionaron 20 pares de folíolos sanos de los cuatro puntos cardinales, ubicados en la parte media del dosel del árbol (Ojeda-Barrios *et al.*, 2014). Posteriormente, las muestras fueron lavadas con agua común para continuar con un enjuague en ácido clorhídrico al 0.3% para finalizar con un enjuague en agua desionizada. Las muestras fueron secadas a 65 °C en una estufa (Heratherm™ VCA 230, Thermo Scientific™). Las muestras se homogeneizaron en un molino (Thomas Scientific®) con malla de 0.25 mm. La concentración de Zn en hojas fue medida usando la metodología de diseño de Moore y Chapman (1986), el cual consistió en 1 g de muestra seca y molida, se agregó ácido nítrico y ácido perclórico en una proporción 2:1 para realizar una digestión ácida durante 6 h resultando una solución transparente e incolora. El volumen de la muestra se ajustó a 100 mL con agua destilada. Se utilizaron las soluciones estándar de 10, 20, 40, 80 y 160 mg L⁻¹ de Zn con un estándar de referencia marca Perkin Elmer®. Se trazó la curva estándar y se procedió a medir su concentración con un espectrofotómetro de absorción atómica (Perkin Elmer® Analyst 700).

Perfil de Ácidos Grasos

El perfil de ácidos grasos se determinó mediante cromatografía de gases, la extracción de estos ácidos se realizó en dos fases. En la primera fase el método utilizado para la sustracción de la fracción lipídica de las muestras fue el método de Folch, Lees y Sloane (1957) utilizando cloroformo y metanol como solventes proporción 2:1 (v/v). En la segunda fase la metilación de ácidos grasos fue de acuerdo al método No. 969.33 descrito por la AOAC (1998). Se extrajo 1 µL del extracto final para su inyección en el cromatógrafo de gases Agilent® modelo 7820, equipado con un detector de ionización de flama, se empleó una columna TG-WAXMS® 30 m × 0.32 mm × 0.25 µm (Omega wax 320) marca Supelco. La temperatura del inyector y detector fue programada a 260 °C por 40 minutos empleando como gas acarreador Helio 3 mL min⁻¹ para la separación y cuantificación de los ácidos grasos se empleó una mezcla de 37 ácidos grasos de metil ésteres de C4-C24 marca Supelco como estándar externo. Los resultados se cuantificaron por el método de estandarización empleando el área bajo la curva de los picos de los ácidos grasos identificados.

Determinación de Proteína Cruda, Grasa y Humedad

La determinación del contenido de proteína cruda, grasa y humedad fue con el método descrito por la AOAC (1998). Para cuantificar el porcentaje de proteína cruda se utilizó el método Kjeldahl (988.05) en un micro digestor Kjeldahl marca

Labconco® modelo 65 000. Posteriormente para convertir el porcentaje de nitrógeno a porcentaje de proteína se aplicó un factor de corrección de 5.3 (Álvarez, Urrea y De la Rosa, 2018). El contenido de grasa se determinó por el método Soxhlet (920.39) con solvente extracto etéreo, utilizando seis horas como tiempo de extracción y el porcentaje de humedad por el método de secado (920.39), utilizando una estufa marca Yamato® modelo Constant Temperature Ove DKN602C de aire forzado con una temperatura de 65-80 °C por un tiempo de 24 horas.

Diseño Experimental y Análisis Estadístico

El diseño experimental empleado fue bloques al azar con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones, dos árboles por repetición, de tal forma que incluyó un total de 32 árboles en el experimento. Los datos fueron analizados mediante un ANOVA usando SAS 9.0 (SAS Institute, Cary, NC), y una prueba de comparación de medias por Tukey ($P \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento

Los resultados para rendimiento fueron estadísticamente significativos ($P < 0.0001$), se encontró que este fue superior en los árboles con las aplicaciones (Cuadro 1). El tratamiento 2 ($4\ 000\ \text{mg L}^{-1}\ \text{ZnSO}_4$) mostró $44.5\ \text{kg árbol}^{-1}$ mientras que los tratamientos 3 y 4 (2000 y $4000\ \text{mg L}^{-1}\ \text{nps ZnO}$) presentaron valores de 48.62 y $57.62\ \text{kg árbol}^{-1}$, respectivamente. Castillo-González *et al.* (2019) mencionan la deficiencia severa de Zn en arboles de nogal como factor que causa la disminución de rendimiento en un 57%. Los resultados coinciden con lo reportado por diversos autores donde declaran que las nanopartículas tienen un efecto en el aumento del rendimiento en diversos cultivos. Davarpanah *et al.* (2016) afirman que las nanopartículas de Zn y B tuvieron efecto positivo sobre el rendimiento y calidad de *Punica granatum* cv. Ardestani L. Mekawy (2021) informa de un incremento en el rendimiento bruto total en *Vitis vinifera* L. sin semilla con la dosis de $240\ \text{mg L}^{-1}$ de nps-ZnO. García-López *et al.* (2018) concluyeron que el uso de nanopartículas de ZnO podría emplearse en la producción de *Capsicum chinense* Jacq. para mejorar el rendimiento del fruto. Amiri, Fallahi y Safi-Songhorabad (2014) realizaron aplicaciones de Zn en *Malus* encontrando un aumento en el rendimiento y peso del fruto.

Cuadro 1. Valores medios en rendimiento, número de nueces kg^{-1} , largo y ancho en nuez pecanera tratada con aplicaciones foliares de nanopartículas de ZnO.

Table 1. Mean values in yield, number of nuts kg^{-1} , length, and width in pecan nuts treated with foliar applications of ZnO nanoparticles.

Tratamiento	Rendimiento	Número de nueces kg^{-1}	Largo	Ancho
Unidades	kg árbol^{-1}		cm	
T1	$27.00 \pm 8.21\ \text{b}$	$201.50 \pm 7.84\ \text{a}$	$3.83 \pm 0.07\ \text{a}$	$2.08 \pm 0.03\ \text{a}$
T2	$44.50 \pm 8.50\ \text{b}$	$216.50 \pm 17.07\ \text{a}$	$3.65 \pm 0.08\ \text{b}$	$2.05 \pm 0.02\ \text{a}$
T3	$48.62 \pm 8.19\ \text{ab}$	$191.63 \pm 7.85\ \text{a}$	$3.80 \pm 0.09\ \text{a}$	$2.04 \pm 0.02\ \text{a}$
T4	$57.62 \pm 8.78\ \text{a}$	$199.50 \pm 5.71\ \text{a}$	$3.83 \pm 0.12\ \text{a}$	$2.06 \pm 0.02\ \text{a}$
Significancia	**	NS	*	NS

Cada valor es la media ($n=32$) \pm desviación estándar (DE) de las muestras de los tratamientos. Las mismas letras en la misma columna indicaron que no hay diferencia significativa según la prueba de Tukey al nivel del 5% ($P < 0.05$). Each value is the mean ($n=32$) \pm standard deviation (SD) of treatment samples. The same letters in the same column indicated no significant difference according to Tukey's test at the 5% level ($P < 0.05$).

Largo y Ancho de Fruto

Se observaron diferencias significativas en el largo del fruto ($P = 0.003$), (Cuadro 1). El tratamiento 2 ($4000 \text{ mg L}^{-1} \text{ ZnSO}_4$) fue inferior con un valor de 3.65 cm. En la variable ancho del fruto no se detectaron diferencias entre tratamientos. Estos resultados son similares en el ancho del fruto, pero diferentes en el largo de acuerdo a los datos publicados por Vargas-Piedra y Arreola (2008). Estos autores concluyen que la fertilización con diferentes nutrientes no ejerce efecto alguno sobre estas variables.

Número de Nueces por Kilogramo (nueces kg^{-1})

No se encontraron diferencias significativas ($P > 0.05$) para la variable número de nueces por kilogramo (Cuadro 1). De acuerdo con la NMX-Ff-084- SCFI-2009, los valores encontrados a excepción del tratamiento 2 ($4000 \text{ mg L}^{-1} \text{ ZnSO}_4$), corresponden al número promedio de nuez (171 a 210 nueces kg^{-1}). Estos resultados son similares a los reportados por Ojeda-Barrios, Hernández, Martínez, Núñez y Perea (2009) donde la aplicación de quelatos de Zn no tuvo ningún efecto en esta variable y contrastan a las diferencias significativas reportados por Cruz-Álvarez *et al.*, (2020) con relación a los diversos tratamientos de fertilización nitrogenada.

Concentración Foliar de Zn

La concentración de Zn en hoja mostró diferencias altamente significativas ($P < 0.0001$) para la primera y segunda aplicación. El tratamiento 4 ($4000 \text{ mg L}^{-1} \text{ nps ZnO}$) presentó mayor aumento en el contenido de Zn, con una concentración de 29.94 mg kg^{-1} en la primera aplicación y 45.45 mg kg^{-1} para la segunda aplicación (Figura 1). Este tratamiento 4, que estadísticamente fue igual en las dos aplicaciones al tratamiento 2 ($4000 \text{ mg L}^{-1} \text{ ZnSO}_4$), con una concentración de 26.76 mg kg^{-1} en la primera aplicación y 43.39 mg kg^{-1} para la segunda. Con las dosis evaluadas y las dos aplicaciones llevadas a cabo no se logró llegar a concentraciones superiores de 50 mg kg^{-1} , límite mencionado como umbral de deficiencia de Zn de acuerdo a los estándares nutricionales señalados por Medina y Chávez (1999). Estudios realizados por diversos autores mencionan la efectividad como fertilizante de las nanopartículas en el incremento de este micronutriente en plantas. Rossi *et al.* (2019) mencionan que la aplicación de nanopartículas de Zn en menores cantidades que las aplicadas con sulfato de zinc (ZnSO_4), lograron incrementar el contenido de este metal en plantas de *Coffea arabica* L. Al respecto, Davarpanah *et al.* (2016), encontró que diversas dosis de nps de Zn aplicadas a huertas de *Punica granatum* cv. *Ardestani* L. aumentaban significativamente el contenido de Zn en sus hojas.

Ácidos Grasos

El Cuadro 2, muestra el contenido relativo de los principales ácidos grasos saturados (C16:0) y (C18:0) e insaturados (C18:1, C18:2 y C18:3), así como sus trazas. En relación a los ácidos grasos saturados con mayor porcentaje encontrados en las muestras, C16:0 mostró resultados estadísticamente significativos ($P = 0.026$), obteniendo los porcentajes más altos (9.37% y 9.21%) en los tratamientos fertilizados con nanopartículas de ZnO (T3 y T4). De manera similar, la respuesta a los tratamientos con nanopartículas aumentó significativamente ($P < 0.001$) el contenido de C18:0 con porcentajes de 3.49 y 3.88%, respectivamente.

De manera inversa, los tratamientos con los nanomateriales mostraron una disminución en el contenido de grasas insaturadas (Cuadro 2). El efecto de los tratamientos 3 y 4, redujeron significativamente ($P = 0.011$) el ácido graso C18:1

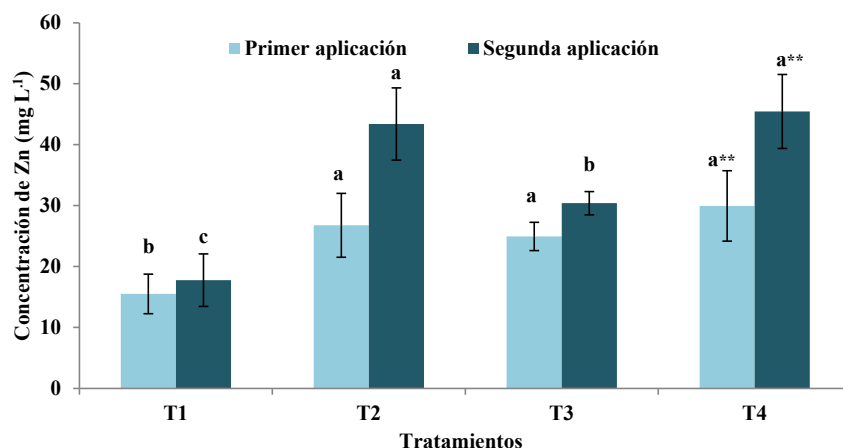


Figura 1. Asimilación de Zn en folíolos en árboles de nuez pecanera como efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de ZnO. Los valores son el promedio de cuatro repeticiones. Las barras de error representan la desviación estándar de la media (n=32). Diferentes letras indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

Figure 1. Assimilation of Zn in leaflets in pecan trees as an effect of foliar application of ZnO nanoparticles. Values are the average of four replicates. Error bars represent the standard deviation from the mean (n=32) and different letters indicate significant differences (Tukey, $P \leq 0.05$).

presente en cantidades mayores en las muestras analizadas, el contenido relativo de C18:3 mostro la misma tendencia con una reducción altamente significativa ($P < 0.001$) para los mismos tratamientos. El contenido relativo de C18:2, no mostró alteración con respecto a los tratamientos.

En los contenidos de las trazas de ácidos grasos saturados (SFA), ácidos grasos monoinsaturados (MUFA) y ácidos grasos poliinsaturados (PUFA) (Cuadro 2), no se encontró diferencia significativa entre tratamientos.

Aunque los porcentajes para PUFA/SFA, MUFA/SFA y UFA/SFA (Figura 2) disminuyeron significativamente en los tratamientos 3 y 4 (2 000 y 4 000 mg L⁻¹ nps ZnO).

Diversos autores mencionan la modificación de los ácidos grasos como efecto del uso de nanomateriales, debido al efecto oxidativo inducido. Fazelian, Yousefzadi y Movafeghi (2020) mencionan en una evaluación con aplicación de

Cuadro 2. Valores medios en el porcentaje de ácidos grasos, trazas de ácidos grasos saturados (SFA), ácidos grasos monoinsaturados (MUFA) y ácidos grasos poliinsaturados (PUFA) en nuez pecanera tratada con aplicaciones foliares de nanopartículas de ZnO.

Table 2. Mean values in the percentage of fatty acids, traces of saturated fatty acids (SFA), monounsaturated fatty acids (MUFA) and polyunsaturated fatty acids (PUFA) in pecan nuts treated with foliar applications of ZnO nanoparticles.

Tratamiento	Principales ácidos grasos					Trazas		
	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	SFA	MUFA	PUFA
T1	8.57±1.38 ab	2.49± 0.40 b	52.56±4.09 a	32.08±3.91 a	1.73±0.30 a	1.08±0.39 a	0.56±0.25 a	0.84±0.47 a
T2	7.67±1.61 b	2.61±0.75 b	51.82±2.68 a	32.87±4.06 a	1.93±0.46 a	0.90±0.45 a	0.77±0.53 a	1.22±0.15 a
T3	9.37±0.77 a	3.49±1.47 a	48.26±3.92 b	35.13±5.26 a	1.30±0.17 b	0.81±0.38 a	0.77±0.27 a	0.78±0.24 a
T4	9.21±2.48 ab	3.88±1.27 a	51.58±2.73 ab	31.85±4.55 a	1.27±0.29 b	0.82±0.37 a	0.71±0.35 a	0.57±0.39 a
Significancia	*	**	*	NS	**	NS	NS	NS

Cada valor es la media (n=32) ± desviación estándar (DE) de las muestras de los tratamientos por duplicado. Las mismas letras en la misma columna indicaron que no hay diferencia significativa según la prueba de Tukey al nivel del 5% ($P < 0.05$).

Each value is the mean (n=32) ± standard deviation (SD) of duplicate treatment samples. The same letters in the same column indicated no significant difference according to Tukey's test at the 5% level ($P < 0.05$).

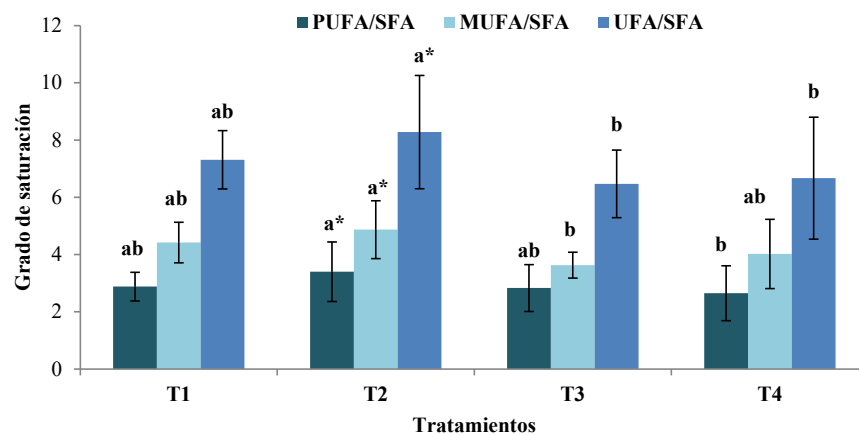


Figura 2. Porcentajes de PUFA/SFA, MUFA/SFA, UFA/SFA en nuez pecanera tratada con aplicaciones foliares de nanopartículas de ZnO. Las barras de error representan la desviación estándar de la media (n=32). Diferentes letras indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

Figure 2. Percentages of PUFA/SFA, MUFA/SFA, and UFA/SFA in pecan nuts treated with foliar applications of ZnO nanoparticles. Error bars represent standard deviation from the mean (n=32). Different letters indicate significant differences (Tukey, $P \leq 0.05$).

diversos nanomateriales en microalgas verdes *Nannochloropsis oculata* que las nanopartículas de ZnO fueron las que incrementaron el contenido de grasas saturadas en comparación con los otros tratamientos, destacan un mayor porcentaje en el contenido de C16:0. En condiciones de estrés, los ácidos grasos no saturados se convierten en ácidos grasos saturados; en un estudio en *Arachis hypogaea* L. las nps de Fe_2O_3 mostraron una alteración en el porcentaje de C16:0 (Rui *et al.*, 2018).

Yuan, He, Huang, Hua y Daniel (2016) encontraron un aumento en las grasas saturadas y una reducción en las grasas poliinsaturadas en *Arabidopsis thaliana*, atribuyen lo anterior a las acumulaciones significativas de superóxidos radicales, ya que los PUFA son altamente susceptibles al ataque oxidativo. Huang *et al.*, (2019), mostraron una reducción estadísticamente significativa en la proporción de ácido linolénico en las nueces pecaneras "occidentales" con la aplicación de pulverizaciones de $ZnSO_4$ al 0.4% para hojas o ruzno (1.1% de ácido linolénico) en comparación con un control tratado con agua purificada (1.4% de ácido linolénico). En nuestro trabajo la alteración a los ácidos grasos en la nuez pecanera es efecto del uso de dosis altas debido al posible estrés oxidativo producido.

Proteína Cruda

El porcentaje de proteína cruda en fruto mostró diferencias significativas ($P = 0.001$), los tratamientos 1 y 2 (tratamiento control y químico de $4000 \text{ mg L}^{-1} ZnSO_4$) presentaron los porcentajes más altos con 11.32 y 11.54%, respectivamente. Los tratamientos 3 y 4 (2000 y 4000 mg L^{-1} de nps ZnO) mostraron 10.09 y 9.51% (Cuadro 3).

Los resultados anteriores muestran falta de respuesta con el uso de nanopartículas en árboles de nogal. Bandyopadhyay *et al.* (2015) mostraron resultados semejantes, concluyen que las nanopartículas de ZnO en *Medicago sativa* L. disminuye el área foliar y la proteína contenida en la hoja comparado con el control. De manera opuesta, las nanopartículas de ZnO presentaron un efecto positivo en el contenido de proteína cruda en *Phaseolus vulgaris* L. comparado con el control (Marzouk, Abd-Alrahman, El-Tanahy y Hosni-Mahmoud, 2019), y un incremento en el contenido de proteína total en el cultivo de *Triticum aestivum* L. fertilizado con nanopartículas de

Cuadro 3. Promedios de porcentaje de proteína cruda, grasa y humedad en nuez pecanera tratada con aplicaciones foliares de nanopartículas de ZnO.
Table 3. Average percentages of crude protein, fat and moisture in pecan nuts treated with foliar applications of ZnO nanoparticles.

Tratamientos	Proteína cruda	Grasa	Humedad
	----- % -----		
T1	11.32±0.72 ba	70.58±2.19 a	2.38±0.21 a
T2	11.54±0.83 a	66.14±2.06 a	2.74±0.16 a
T3	10.09±1.02 bc	72.75±2.10 a	2.38±0.28 a
T4	9.51±0.58 c	69.45±4.21 a	2.49±0.21 a

Cada valor es la media (n = 32) ± desviación estándar (DE) de las muestras de los tratamientos. Las mismas letras en la misma columna indicaron que no hay diferencia significativa según la prueba de Tukey al nivel del 5% ($P < 0.05$).
 Each value is the mean (n = 32) ± standard deviation (SD) of treatment samples. The same letters in the same column indicated no significant difference according to Turkey's test at the 5% level ($P < 0.05$).

ZnO comparados con un control y con ZnO a granel (Ramesh *et al.*, 2014). El Zn aplicado en dosis adecuadas es capaz de aumentar la síntesis de proteínas, pero en dosis altas puede desencadenar fitotoxicidad (Bandyopadhyay *et al.*, 2015). En esta investigación posiblemente ocurrió un desplazamiento de micronutrientes en sitios funcionales debido a la alta acumulación de Zn y como consecuencia una disminución en el contenido de proteína cruda.

Grasa

No se encontró diferencia significativa ($P > 0.05$) en los porcentajes de grasa en la nuez, los valores oscilaron entre el 66.14 y 72.75% en los tratamientos (Cuadro 3). Sin embargo, Saadatia, Moallemia, Mortazavia y Seyyednejad (2013) reportan que las aplicaciones de Zn y B tienen un efecto positivo en árboles de *Olea europea* L. al aumentar el contenido de grasa en fruto. De manera similar, Wang *et al.* (2020) también comprobaron un aumento en el contenido de aceite en fruto de *Carya illinoensis* tratada con dosis de Zn.

Humedad

En el contenido de humedad del fruto no se encontró diferencia significativa entre tratamientos ($P > 0.05$), (Cuadro 3). Los valores encontrados se encuentran dentro del límite establecido por la Norma Mexicana NMX-Ff-084-SCFI-2009 (SE, 2009).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente trabajo, indican que el uso de las nanopartículas de ZnO aplicadas de manera foliar, pueden ser usadas para disminuir la deficiencia de Zn de manera efectiva, aumentando por ende el rendimiento significativamente. La calidad nutraceútica se ve afectada, ya que la influencia de estas nanopartículas aumenta de manera significativa los ácidos grasos saturados y disminuye los ácidos grasos insaturados, además del porcentaje de proteína cruda. Las nanopartículas pueden ser usadas para mejorar el rendimiento y abastecer el contenido de Zn al cultivo, pero la calidad de fruto se ve afectada desde el punto de vista nutricional.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FONDOS

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización y metodología: K.L.E.A. y C.V.V. Protocolo de laboratorio y supervisión: R.B.G. y M.D.M.R. Análisis estadísticos y revisión de resultados: L.M.V.N. y M.A.G.R. Corrección de estilo y preparación del manuscrito: L.M.V.N. Supervisión: J.L.G.H.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Facultad de Agricultura y Zootecnia, Centro de Investigación de Química Aplicada, Centro de Investigación de Alimentación y Desarrollo y al Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera por el apoyo brindado para el desarrollo del presente estudio.

LITERATURA CITADA

- Ali, S., Rizwan, M., Noureen, S., Anwar, S., Ali, B., Naveed, M., Abd Allah, E. F., ... Ahmad, P. (2019). Combined use of biochar and zinc oxide nanoparticle foliar spray improved the plant growth and decreased the cadmium accumulation in rice (*Oryza sativa* L.). *Environmental Science and Pollution Research*, 26(11), 11288-11299. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04554-y>
- Achari, G. A., & Kowshik, M. (2018). Recent developments on nanotechnology in agriculture: plant mineral nutrition, health, and interactions with soil microflora. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(33), 8647-8661. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b00691>
- Álvarez-Parrilla, E., Urrea-López, R., & De la Rosa, L. A. (2018). Bioactive components and health effects of pecan nuts and their by products: a review. *Journal of Food Bioactives*, 2018(1), 56-92. <https://doi.org/10.31665/JFB.2018.1127>
- Amiri, M. E., Fallahi, E., & Safi-Songhorabad, M. (2014). Influence of rootstock on mineral uptake and scion growth of 'Golden Delicious' and 'Royal Gala' apples. *Journal Plant Nutrition*, 37(1), 16-29. <https://doi.org/10.1080/01904167.2013.792838>
- AOAC (1998). *Official Methods of Analysis of AOAC* (15th ed.). Washington, DC, USA: Association of Official Analytical Chemists
- Bandyopadhyay, S., Plascencia-Villa, G., Mukherjee, A., Rico, C. M., José-Yacamán, M., Peralta-Videa, J. R., & Gardea-Torresdey, J. L. (2015). Comparative phytotoxicity of ZnO NPs, bulk ZnO, and ionic zinc onto the alfalfa plants symbiotically associated with *Sinorhizobium meliloti* in soil. *Science of the Total Environment*, 515, 60-69. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.02.014>
- Betancourt-Galindo, R., Berlanga-Duarte, M. L., Puente-Urbina, B. A., Rodríguez-Fernández, O. S., & Sánchez-Valdés, S. (2010). Surface modification of ZnO nanoparticles. *Materials Science Forum*, 644, 61-64. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.644.61>

- Castillo-González, J., Ojeda-Barrios, D., Hernández-Rodríguez, A., Abadía, J., Sánchez, E., Parra-Quezada, R., ... Sida-Arreola, J. (2019). Zinc nutritional status of pecan trees influences physiological and nutritional indicators, the metabolism of oxidative stress, and yield and fruit quality. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici*, 47(2), 531-537. <https://doi.org/10.15835/nbha47211389>
- Castillo-González, J., Ojeda-Barrios, D., Hernández-Rodríguez, A., González-Franco, A. C., Robles-Hernández, L., & López-Ochoa, G. R. (2018). Zinc metalloenzymes in plants. *Interciencia*, 43(4), 242-248.
- Cruz-Álvarez, O., Hernández-Rodríguez, A. O., Jacobo-Cuellar, J. L., Ávila-Quezada, G., Morales-Maldonado, E., Parra-Quezada, R. A., ... Ojeda-Barrios, D. L. (2020). Nitrogen fertilization in pecan and its effect on leaf nutrient concentration, yield and nut quality. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 26(3), 163-173.
- Davarpanah, S., Tehranifar, A., Davarynejad, G., Abadía, J., & Khorasani, R. (2016). Effects of foliar applications of zinc and boron nano-fertilizers on pomegranate (*Punica granatum* cv. Ardestani) fruit yield and quality. *Scientia Horticulturae*, 210, 57-64. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.07.003>
- Dimkpa, C. O., White, J. C., Elmer, W. H., & Gardea-Torresdey, J. (2017). Nanoparticle and ionic Zn promote nutrient loading of sorghum grain under low NPK fertilization. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 65, 8552-8559. <http://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02961>
- Faizan, M., Faraz, A., & Hayat, S. (2020). Effective use of zinc oxide nanoparticles through root dipping on the performance of growth, quality, photosynthesis and antioxidant system in tomato. *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*, 29(3), 553-567. <https://doi.org/10.1007/s13562-019-00525-z>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2018). Food and agriculture data (FAOSTAT). Consultado el 20 de septiembre del 2020 desde, <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- Fazelian, N., Yousefzadi, M., Movafeghi, A. (2020). Algal response to metal oxide nanoparticles: Analysis of growth, protein content, and fatty acid composition. *Bioenergy Research*, 13, 944-954. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10099-7>
- Folch, J., Lees, M., & Sloane-Stanley, G. H. (1957). A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues. *Journal Biology Chemistry*, 226(1), 497-509.
- García-López, J. I., Lira-Saldívar, R. H., Zavala-García, F., Olivares-Sáenz, E., Niño-Medina, G., Ruiz-Torres, N. M., ... Díaz-Barriga, E. (2018). Effects of zinc oxide nanoparticles on growth and antioxidant enzymes of *Capsicum chinense*. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 100(5-7), 560-572. <https://doi.org/10.1080/02772248.2018.1550781>
- Genaidy, E. A., Abd-Alhamid, N., Hassan, H. S., Hassan, A. M., & Hagagg, L. F. (2020). Effect of foliar application of boron trioxide and zinc oxide nanoparticles on leaves chemical composition, yield and fruit quality of *Olea europaea* L. cv. Picual. *Bulletin of the National Research Centre*, 44(1), 1-12. <https://doi.org/10.1186/s42269-020-00335-7>
- Hernández-López, M., Rodríguez-Ortiz, J. C., Hernández-Montiel, L. G., Figueroa-Viramontes, U., Zapata-Sifuentes, G., & Preciado-Rangel, P. (2020). Corrección de la sintomatología "oreja de ratón" en nogal pecanero con aplicaciones foliares de níquel. *Terra Latinoamericana*, 38(1), 833-840. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.791>
- Huang, R., Shen, C., Wang, S., & Wang, Z. (2019). Zinc content and fruit quality of pecan as affected by application of zinc sulfate. *HortScience*, 54(7), 1243-1248. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13750-18>
- Marzouk, N. M., Abd-Alrahman, H. A., El-Tanahy, A. M. M., & Hosni-Mahmoud, S. (2019). Impact of foliar spraying of nano micronutrient fertilizers on the growth, yield, physical quality, and nutritional value of two snap bean cultivars in sandy soils. *Bulletin of the National Research Centre*, 43(1), 1-9. <https://doi.org/10.1186/s42269-019-0127-5>
- Medina, M. C., & Chávez, J. F. (1999). Efecto del abastecimiento foliar de zinc sobre el balance nutrimental del nogal pecanero. *Terra Latinoamericana*, 17(4), 293-298.
- Mekawy, A. Y. (2021). Effect of foliar spraying with zinc Oxide nanoparticles on vegetative growth and cluster development of flame seedless grapevine. *Journal of Plant Production*, 12(3), 345-351. <https://doi.org/10.21608/jpp.2021.163484>
- Méndez-Argüello, B., Vera-Reyes, I., Mendoza-Mendoza, E., García-Cerda, L. A., Puente-Urbina, B. A., & Lira-Saldívar, R. H. (2016). Promoción del crecimiento en plantas de *Capsicum annum* por nanopartículas de óxido de zinc. *Nova Scientia*, 17(8), 140-156.
- Moore, P. D., & Chapman, S. B. (1986). *Chemical analysis. Methods in Plant Ecology*. Oxford, United Kingdom: Blackwell Scientific Publications. ISBN: 0632009896
- Ojeda-Barrios, D. L., Hernández-Rodríguez, O. A., Martínez-Téllez, J., Núñez-Barrios, A., & Perea-Portillo, E. (2009). Aplicación foliar de quelatos de zinc en nogal pecanero. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 15(2), 205-210.
- Ojeda-Barrios, D. L., Perea-Portillo, E., Hernández-Rodríguez, O. A., Ávila-Quezada, G., Abadía, J., & Lombardini, L. (2014). Foliar fertilization with zinc in pecan trees. *HortScience*, 49(5), 562-566.
- Ramesh, M., Palanisamy, K., Babu, K., & Sharma, N. K. (2014). Effects of bulk & nano-titanium dioxide and zinc oxide on physio-morphological changes in *Triticum aestivum* Linn. *Journal of Global Biosciences*, 3(2), 415-422.
- Rizwan, M., Ali, S., Ali, B., Adrees, M., Arshad, M., Hussain, A., ... Waris, A. A. (2019). Zinc and iron oxide nanoparticles improved the plant growth and reduced the oxidative stress and cadmium concentration in wheat. *Chemosphere*, 214, 269-277. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.120> <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.120>
- Rossi, L., Fadenia, L.N., Sharifan, H., Ma, X., & Lombardini, L. (2019). Effects of foliar application of zinc sulfate and zinc nanoparticles in coffee (*Coffea arabica* L.), *Plant Physiology and Biochemistry*, 135, 160-166. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.12.005>

- Rui, M., Ma, C., White, J. C., Hao, Y., Wang, Y., Tang, X., ... Xing, B. (2018). Metal oxide nanoparticles alter peanut (*Arachis hypogea* L.) Physiological response and reduce nutritional quality; a life cycle study. *Environmental Science: Nano*, 5(9), 2088-2102. <https://doi.org/10.1039/C8EN00436F>
- Saadatia, S., Moallemia, N., Mortazavia, S. M. H., & Seyyednejad, S. M. (2013). Effects of zinc and boron foliar application on soluble carbohydrate and oil contents of three olive cultivars during fruit ripening. *Scientia Horticulturae*, 164, 30-34. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.08.033>
- Sabir, S., Arshad, M., & Chaundhari, S. K. (2014). Zinc oxide nanoparticles for revolutionizing agriculture: Synthesis and applications. *The Scientific World Journal*, 2014, 1-9 <http://doi.org/10.1155/2014/925494>
- Sabir, S., Zahoor, M. A., Waseem, M., Siddique, M. H., Shafique, M., Imran, M., ... Muzammil, S. (2020). Biosynthesis of ZnO nanoparticles using bacillus subtilis: characterization and nutritive significance for promoting plant growth in *Zea mays* L. *Dose-Response*, 18(3), 1-9. <https://doi.org/10.1177%2F1559325820958911>
- Sánchez, E., Soto, J. M., Sosa-Cerecedo, M., Yáñez, R. M., Muñoz, E., & Anchondo, Á. (2009). Eficiencia de uso del nitrógeno en nogal pecanero. *Terra Latinoamericana*, 27(4), 311-317.
- SE (Secretaría de Economía). (2009). Norma Oficial Mexicana NMX-Ff-084-SCFI-2009. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano - fruto fresco - nuez pecanera *Carya illinoensis* (Wangenh) K. Koch - especificaciones y métodos de prueba. *Diario Oficial de la Federación*. D.F.: SEGOB.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2021). *Panorama agroalimentario*. Edición, 2021. Consultado el 20 de enero del 2022, desde https://nube.siap.gob.mx/panorama_siap/pag/2021/Panorama-Agroalimentario-2021
- Shojaei, T. R., Salleh, M. A. M., Tabatabaei, M., Mobli, H., Aghbashlo, M., Rashid, S. A., & Tan, T. (2019). Applications of nanotechnology and carbon nanoparticles in agriculture. In S. A. Rashid, R. N. I. Raja Othman, & Hussein, Z (Eds.). *Synthesis, Technology and Applications of Carbon Nanomaterials* (pp. 247-277). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815757-2.00011-5>
- Vargas-González, G., Álvarez-Reyna, V. P., Guigón-López, C., Cano-Ríos, P., & García-Carrillo, M. (2019). Impacto ambiental por uso de plaguicidas en tres áreas de producción de melón en la Comarca Lagunera, México. *CienciaUAT*, 13(2), 113-127. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v13i2.1141>
- Vargas-Piedra, G., & Arreola-Ávila, J. G. (2008). Respuesta del nogal pecanero (*Carya illinoensis* K. Koch) a las aplicaciones foliares de nutrimentos. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 7(1), 7-14.
- Wang, Y., Heereme, R. J., Walworth, J. L., Dungan, B., Vanleeuwen, D., & Holguin, F. O. (2020). Nutraceutical properties of pecan kernels are affected by soil zinc fertilizer application. *HortScience*, 55(12), 2001-2007. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI15314-20>
- Wood, B. W., & Payne, J. A. (1997). Comparison of ZnO and ZnSO₄ for correcting severe foliar zinc deficiency in pecan. *HortScience*, 32(1), 53-56. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.32.1.53>
- Yuan, J., He, A., Huang, S., Hua, J., & Daniel-Sheng, G. (2016). Internalization and phytotoxic effects of CuO nanoparticles in *Arabidopsis thaliana* as revealed by fatty acid profiles. *Environmental Science & Technology*, 50(19), 10437-10447. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02613>
- Zhang, R., Peng, F., & Li, Y. (2015) Pecan Production in China. *Scientia Horticulturae*, 197, 719-727. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.10.035>