

La biofortificación con nanopartículas de cobre mejora el rendimiento y compuestos bioactivos en frutos de melón

Alain Buendía-García¹
Pablo Preciado-Rangel²
José R. Paredes-Jácome¹
Reyna R. Guillén-Enríquez²
Selene Y. Márquez-Guerrero²
Ricardo I. Ramírez-Gottfried^{1,§}

1 Unidad Laguna-Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Periférico Raúl López Sánchez y Carretera Santa Fe s/n, Torreón, Coahuila, México. CP. 27010. (alain75191@hotmail.com; gottfried-ricardo@hotmail.com; rafaelparedes93@hotmail.com).

2 Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Torreón. Carretera Torreón-San Pedro km 7.5, Ejido Ana, Torreón, Coahuila, México. CP. 27170. (reguillen@outlook.com; selenne.marquez@hotmail.com).

Autor para correspondencia: gottfried-ricardo@hotmail.com

Resumen

El uso de la nanotecnología permite mayor sustentabilidad en los sistemas agrícolas al reducir el impacto ambiental por el uso de los agroquímicos. Entre los principales nanoproductos, las nanopartículas metálicas (NPs) se han utilizado para mejorar el rendimiento y modular los compuestos bioactivos en los cultivos. El presente estudio fue realizado durante el ciclo primavera verano de 2022, teniendo como objetivo evaluar la aspersion foliar de cinco dosis crecientes de nanopartículas de cobre (NPs CuO): 150, 200, 250, 300 y 350 mg L⁻¹ y un tratamiento testigo en el cultivo de melón. Durante la cosecha se determinó el rendimiento, calidad nutracéutica, actividad enzimática y su bioacumulación en frutos de melón. La aplicación foliar de NPs CuO indujo un aumento en el rendimiento y en la biosíntesis de compuestos bioactivos, así como su bioacumulación en la pulpa; sin embargo, dosis altas causan el efecto contrario debido a su acumulación. Las respuestas del cultivo de melón a las NPs CuO dependen de la dosis utilizada ya que pueden inducir efectos benéficos o negativos por lo que es necesario seguir realizando investigaciones al respecto.

Keywords:

Cucumis melo L., antioxidantes, nano-biofortificación.



Introducción

El melón (*Cucumis melo* L.) es una fruta con alto contenido de propiedades nutritivas que pertenece a la familia de las cucurbitáceas, se caracteriza por contener una gran cantidad de proteínas, lípidos, vitamina C, beta carotenos, antioxidantes y polifenoles bioactivos (Mosquera-Vivas *et al.*, 2019; Rivera-Gutiérrez *et al.*, 2021), además contiene otros fitoquímicos los cuales también son importantes para la prevención de enfermedades (Manchali *et al.*, 2021; Guo *et al.*, 2023).

A nivel mundial se producen aproximadamente 27 millones de toneladas (Kubo *et al.*, 2021; Davidson *et al.*, 2023). En México, la superficie cultivada con melón alcanzó las 19 104 ha anuales, con una producción de 591 574 t (SIAP, 2021). Por otro lado, debido al tipo de alimentación de la población actual es común la deficiencia de oligoelementos como el hierro, cobre, yodo, selenio y zinc, lo que representan un problema de salud mundial (Gío-Trujillo *et al.*, 2022).

El Cu, es un microelemento esencial, no obstante, la deficiencia o el exceso de Cu puede afectar la salud humana (Raha *et al.*, 2020). La deficiencia de Cu conduce a trastornos graves como anemia y neutropenia (Wahab *et al.*, 2020), mientras que en exceso produce trastornos hepáticos y enfermedades como el Alzheimer, así como colapso nervioso (Taylor *et al.*, 2020).

En las plantas, el Cu se encuentra involucrado en reacciones de óxido-reducción, en procesos celulares y moleculares, como la síntesis de clorofila, la fotosíntesis, la respiración, metabolismo de proteínas y carbohidratos (Gaytan-Aleman *et al.*, 2021). Sin embargo, en muchas áreas prevalecen suelos arenosos con bajo contenido de materia orgánica y altos valores de pH, en estos suele acentuarse la deficiencia de Cu (Shabbir *et al.*, 2020). Por lo tanto, es importante adoptar prácticas adecuadas en el manejo de los cultivos para prevenir su deficiencia, tanto en la planta como en el ser humano.

Una alternativa para aumentar el contenido de Cu en la parte comestible de los cultivos y mejorar la nutrición humana es la biofortificación de cultivos; ya que se mejora el contenido nutricional en las partes comestibles de plantas y de esta manera es posible satisfacer los requerimientos de este oligoelemento debido a que no toda la población puede adquirir suplementos minerales comerciales (Dhaliwal *et al.*, 2022). La nanotecnología es una innovación tecnológica que incrementa la sustentabilidad en los sistemas agrícolas al reducir el impacto ambiental por el uso de los agroquímicos (Gutiérrez-Ruelas *et al.*, 2021).

Entre los principales nanoproductos, las nanopartículas metálicas (NPs) se han utilizado para mejorar el rendimiento y modular los compuestos bioactivos en los cultivos (Kalisz *et al.*, 2021). Entre las NPs metálicas, las NPs CuO destacan considerablemente debido a sus propiedades ópticas, catalíticas, mecánicas y eléctricas (Amer y Awwad, 2021). Se ha demostrado que cuando se aplica Cu en *Arabidopsis thaliana*, *Capsicum annuum*, *Solanum lycopersicum* L., este tienen una función estimulante, incrementando la acumulación de compuestos bioactivos, firmeza y calidad de los frutos (López-Vargas *et al.*, 2018).

El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de la aspersión foliar de NPs CuO en el cultivo de melón y determinar sus efectos sobre el rendimiento, calidad comercial y nutraceútica, así como su bioacumulación en frutos.

Materiales y métodos

Ubicación

Este trabajo de investigación se fue realizado en el ciclo primavera-verano del año 2022, bajo condiciones de campo en el ejido Concordia, municipio de San Pedro de las Colonias, Coahuila, México, el cual se encuentra ubicado a 25° 48' 31" latitud norte y 103° 5' 56.4" longitud oeste. Esta zona tiene un clima semicálido con temperaturas medias anuales de 20 a 22 °C y una precipitación media anual de 125 a 400 mm.

Material vegetal y labores culturales

Como material vegetal se utilizó el híbrido de melón cv Crusier (Harris Moran[®]). La siembra directa se realizó el 20 de marzo de 2022. Se construyeron bordos a doble hilera formando camas a una distancia de 4 m entre bordos y una separación entre plantas de 30 cm para una densidad de 16 665 plantas ha⁻¹. La fertilización fue de acuerdo con las recomendaciones del INIFAP, consistente en: 120-60-00 (N-P₂O₅-K₂O), aplicando todo el fósforo y la mitad del nitrógeno al momento de la siembra y el resto del nitrógeno al momento de la floración.

Los fertilizantes utilizados fueron NH₄H₂PO₄ y NH₄SO₄. El riego fue proporcionado por gravedad. En presiembra se aplicó un riego con una lámina de 30 cm; posteriormente, se aplicaron seis riegos de auxilio con láminas de 15 cm cada uno, en total se aplicó una lámina de 120 cm durante el ciclo de cultivo.

Tratamientos y diseño experimental

Las nanopartículas utilizadas fueron donadas por el Centro de Investigación de Química Aplicada de la ciudad de Saltillo, Coahuila. Las NPs CuO fueron obtenidas por síntesis verde y su caracterización es reportada por Ortega-Ortiz *et al.* (2022). El método para elaborar los tratamientos consistió en utilizar una solución madre de NPs CuO. Mediante ella se prepararon cinco dosis diferentes en un matraz con capacidad de un litro, en cada uno de los matraces se vertieron las concentraciones aplicadas, las cuales consistieron en dosis cinco dosis crecientes de NPs CuO: 150, 200, 250, 300 y 350 mg L⁻¹.

En el tratamiento control se utilizó únicamente agua destilada. Se utilizó un diseño de bloques al azar con seis tratamientos y seis repeticiones para un total de 36 unidades experimentales. Cada unidad experimental consistió en cuatro m de largo por 10 m de ancho para un total de 40 m². La aplicación de tratamientos se llevó a cabo de manera directa en la planta mediante una aspersora manual de 20 L. Se disolvió cada concentración de NPs CuO en 10 L de agua destilada. Se realizaron tres aplicaciones, la primera a los 20 días después de la siembra y las siguientes dos aplicaciones se realizaron cada 20 días.

Variables evaluadas

Peso de fruto y rendimiento

Los frutos de todos los tratamientos fueron cosechados a madurez comercial (malla bien formada y cuando el pedúnculo se desprendía fácilmente). Se pesaron todos los frutos cosechados en una báscula digital (Torrey[®], México) con capacidad de 5 kg. El rendimiento se estimó por hectárea considerando el peso total de los frutos en cada unidad experimental. El diámetro polar y ecuatorial se midió utilizando un vernier digital (Truper[®], México) reportando el resultado en cm.

Sólidos solubles y firmeza

La determinación de los SST y la firmeza fue realizada en un midió en un fruto por repetición, los sólidos solubles (°Brix), fueron medidos con un refractómetro manual con un rango de medición de 0 a 32% (Atago[®] Master 2311). La firmeza se midió mediante un penetrómetro modelo FH20000 (Extech[®], USA) con cabezal de medición de 8 mm, el procedimiento consistió en retirar la cascara del fruto, posteriormente se colocó sobre una superficie rígida y plana, se realizaron cuatro penetraciones por fruto, se promediaron y los resultados se expresan en fuerza máxima de compresión en unidades Newton.

Preparación de extractos para antioxidantes no enzimáticos

De cada tratamiento y repetición se seleccionó al azar un melón para la cuantificación de los antioxidantes no enzimáticos, posteriormente de cada fruto se tomaron dos gramos de pulpa fresca mezclada en 10 ml de etanol al 80% en un tubo de plástico con tapa rosca, el cual se colocó en un agitador rotatorio (ATR Inc., USA) durante 6 h a 5 °C y 20 rpm. Posteriormente, los tubos se centrifugaron a 3 000 rpm durante 5 min y se eliminó el sobrenadante para realizar las pruebas analíticas.

Contenido de fenólicos totales

El contenido fenólico total se midió mediante una modificación del método Folin- Ciocalteau (Esparza *et al.*, 2006). Se mezclaron 30 μ l de muestra con 270 μ l de agua destilada en un tubo de ensayo y se agregó 1.5 ml de reactivo Folin-Ciocalteau (Sigma- Aldrich) diluido (1:15), agitando en vórtex durante 10 s. Después de 5 min se añadieron 1.2 ml de carbonato de sodio (7.5% p/v) agitándose durante 10 s.

La solución fue colocada en baño maría a 45 °C por 15 min y luego se dejó enfriar a temperatura ambiente. La absorbancia de la solución fue leída a 765 nm en un espectro fotómetro HACH 4000. El contenido fenólico se calculó mediante una curva patrón usando ácido gálico (Sigma) como estándar y los resultados se reportaron en mg de ácido gálico (AG) equivalente por g de muestra base fresca (mg equiv AG g⁻¹ BF).

Capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante se evaluó de acuerdo al método *in vitro* DPPH⁺, empleando una modificación del método publicado por Brand-Williams (1995). Para la determinación de la capacidad antioxidante se mezclaron 50 μ l de muestra y 950 μ l de solución DPPH⁺, y después de 3 min de reacción se leyó la absorbancia de la mezcla a 515 nm. Se preparó una curva estándar con Trolox (Aldrich) y los resultados se reportaron como capacidad antioxidante equivalente en μ M equivalente en Trolox por g base fresca (μ M equiv Trolox g⁻¹ BF).

Contenido de vitamina C

El contenido de vitamina C se determinó de acuerdo a lo reportado por Hernández-Hernández *et al.* (2019). Se tomaron 10 g de fruta fresca y se molieron con 10 ml de ácido clorhídrico al 2%. Posteriormente se usó un embudo y papel filtro. Se filtró la muestra y el extracto obtenido se completó hasta 100 ml con agua desionizada. A continuación, se utilizó 2,6 diclorofenolindofenol (1×10^{-3} N) para realizar una titulación con 10 ml del diluido. Para determinar la titulación, el color rojizo debe persistir durante unos segundos. Una vez obtenido el color rojizo, se dejó de añadir colorante y se calculó con el volumen gastado. El resultado se expresa en mg 100 g⁻¹ BF.

Contenido de Cu en pulpa

La concentración de cobre en la pulpa de melón se determinó según la AOAC (1990) por espectrofotometría de absorción atómica, con llama de aire-acetileno (Varian-Spectr AA 3110, Palo Alto, CA, EE. UU.), los resultados se expresaron en μ g kg⁻¹ peso seco (PS).

Análisis estadístico

Los datos de las variables fueron analizados mediante análisis de varianza y la comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) utilizando el paquete estadístico Statistical Analysis System Institute (SAS) versión 9.4.

Resultados y discusión

Rendimiento y calidad comercial

El rendimiento y peso de los frutos de melón fueron afectados por las distintas dosis de NPs CuO asperjadas ya que a medida que aumentó la concentración de NPs aplicadas, existe una disminución en estas variables (Cuadro 1). El peso de los frutos tratados con la mayor dosis de NPs CuO exhibieron una disminución del 11% respecto al control. El peso de los frutos de melón fluctúa desde 0.5 a 4 kg (Espinoza-Arellano *et al.*, 2023). Los resultados encontrados en el presente estudio se encuentran dentro de este rango.

Cuadro 1. Rendimiento, peso de frutos, sólidos solubles totales y firmeza de frutos de melón sometidos a diferentes dosis de NPs CuO.

NPs CuO (mg L ⁻¹)	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Peso de fruto (kg)	Sólidos solubles totales (°Brix)	Firmeza (N)
Control	19.77 ±1.4c	1.81 ±0.3 a	12.77 ±0.79 ab	17.08 ±1.4 ab
150	23.78 ±1.7 a	1.63 ±0.2 ab	13.49 ±0.54a	17.83 ±2.0ab
200	24.09 ±1.09 a	1.62 ±0.4 b	12.52 ±0.31ab	19.64 ±1.6 a
250	23.15 ±1.4 ab	1.62 ±0.73ab	12.62 ±0.17 ab	16.34 ±1.1 b
300	19.92 ±1.3 abc	1.55 ±0.2 b	12.69 ±0.19 ab	18.41 ± 2.2b
350	17.58 ±1.5 c	1.53 ±0.1 b	10.66 ±0.67 c	12.24 ±1.4 c

* = medias con letras distintas en la misma columna son estadísticamente diferentes (Tukey $p \leq 0.05$); n= 6 ± desviación estándar.

Por otro lado, los rendimientos obtenidos por las plantas tratadas con 150 y 200 mg L⁻¹, superaron 16 y 18% al obtenido por el tratamiento control. Se ha reportado que las aplicaciones de NPs CuO pueden incrementar el rendimiento de los cultivos (Rajput *et al.*, 2018); sin embargo, dosis altas de este metal provocan una alteración de la cinética de reparación del ADN (Shabbir *et al.*, 2020), efectos negativos en la morfología, fisiología y bioquímica (Da-Costa *et al.*, 2016) y una fitotoxicidad al cultivo (AlQuraidi, *et al.*, 2019).

Desde el punto de vista comercial, se requieren frutos dulces (mínimo 10 °Brix) y con y frutos firmes, ya que de esta manera se mejora la aceptación de los frutos de melón por parte del consumidor. Los resultados obtenidos indican que el uso de dosis bajas de NPs CuO incrementan la firmeza y los SST y dosis altas provocan una disminución en estos parámetros (Cuadro 1).

Similares resultados fueron encontrados por López-Vargas *et al.* (2018) al reportar que dosis altas de NPs CuO disminuyen los SST y la firmeza de frutos. Da-Costa y Sharma. (2016), explican que la disminución de los SST es debido a la disminución en el contenido de pigmentos fotosintéticos en las hojas, trayendo consigo una menor producción de fotosintatos y como consecuencia menor acumulación de azúcares en los frutos.

Por otro lado, el aumento en la firmeza de los frutos provocado por las NPs CuO podría deberse a la lignificación de la pared celular (López-Vargas *et al.*, 2018), efecto que está relacionado con el aumento de la actividad de la enzima Fenilalanina Amonio Liasa; ya que la fenilalanina es un precursor de la síntesis de lignina (Wang *et al.*, 2013). Sin embargo, dosis altas de NPs CuO disminuyen drásticamente la firmeza de los frutos (Hong *et al.*, 2016).

La diversidad de respuestas a las NPs depende de la dosis utilizada, ya por un lado pueden inducir respuestas positivas, negativas o no presentar ningún efecto, este comportamiento, es llamado hormesis y ha sido reportado cuando las NPs se aplican como bioestimulantes en los cultivos (Juárez-Maldonado *et al.*, 2019), motivo por el cual se deben de seguir realizando mayor investigación sobre la dosis, especie y etapa vegetativa de los cultivos.

Compuestos bioactivos en frutos

La producción de alimentos con un alto contenido de compuestos bioactivos es deseable debido a que estos compuestos pueden ayudar a prevenir enfermedades crónicas degenerativas y promover las funciones fisiológicas del organismo. Los resultados obtenidos muestran que la aspersión foliar con NPs CuO, afectaron el contenido de compuestos bioactivos en la pulpa de melón (Cuadro 2). La aplicación foliar de 150 mg L⁻¹ incrementó los compuestos bioactivos: 28,10 y 43% (flavonoides, fenoles y capacidad antioxidante), con relación a los frutos de las plantas no tratadas. Autores como Juárez-Maldonado *et al.* (2018) menciona que las NPs Cu tienen un efecto benéfico en la acumulación de compuestos bioactivos e incrementa la capacidad antioxidante en *M. oleífera*.

Cuadro 2. Efecto de la aspersión foliar NPs CuO sobre compuestos bioactivos en frutos de melón.

NPs CuO (mg L ⁻¹)	Flavonoides (mg QE 100 g ⁻¹ BF)	Fenoles (mg AG 100 g ⁻¹ BF)	Capacidad antioxidante (mg equiv Trolox 100 g ⁻¹ BF)	Vitamina C (mg 100 g ⁻¹ BF)
Control	73.32 ±1.7 c	184.87 ±1.8 c	53.38 ±1 c	40.48 ±4.1 b
150	101.97 ±1.9 a	206.51 ±2.8 a	93.76 ±6 a	54.3 ±1.6 a
200	85.77 ±1.5 b	187.26 ±1.4 bc	71.67 ± 4b	42.82 ±2 b
250	77.82 ±3.7 bc	192.29 ±6 bc	63.65 ±2.9 b	32.98 ±0.57 c
300	77.21 ±1.2bc	188.28 ±8.4 bc	64.38 ±0.51 b	31.2 ±1c
350	71.68 ± 4c	165.84 ±6.1 d	52.07 ±15.1c	20.6 ±1.9d

* = medias con letras distintas en la misma columna son estadísticamente diferentes (Tukey $p \leq 0.05$); $n = 6 \pm$ desviación estándar.

Sin embargo, la mayor dosis causó una drástica disminución de: 29, 19 y 44%, con relación al mejor tratamiento (150 mg L⁻¹). La aplicación de NPs CuO produce especies reactivas de oxígeno, lo que modifican la respuesta de los antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos como respuesta al estrés inducido (Ma *et al.*, 2010; Ahmed *et al.*, 2018). Las especies reactivas de oxígeno desempeñan una función dual, ya que a concentraciones bajas actúan como señalizadores, generando una respuesta moderada de estrés en las plantas, activando así la biosíntesis de compuestos bioactivos, en cambio a concentraciones altas se alta interrumpe la homeostasis celular dañando las estructuras celulares, proteínas, ADN y lípidos (Kumar *et al.*, 2016).

Respecto a la Vitamina C con la aplicación foliar de 150 mg L⁻¹ se encontró un incremento del 25% en comparación al control. López-Vargas *et al.* (2018), reporta similares resultados con la aplicación de 50-250 mg L⁻¹; no obstante, una dosis mayor (500 mg L⁻¹) reduce su contenido. La vitamina C, es un cofactor utilizado para la reacción redox de muchas enzimas. Por ejemplo, el ácido ascórbico juega un papel vital en las células de las plantas, especialmente en el ciclo ácido ascórbico-glutatión, que se encarga de la donación de electrones.

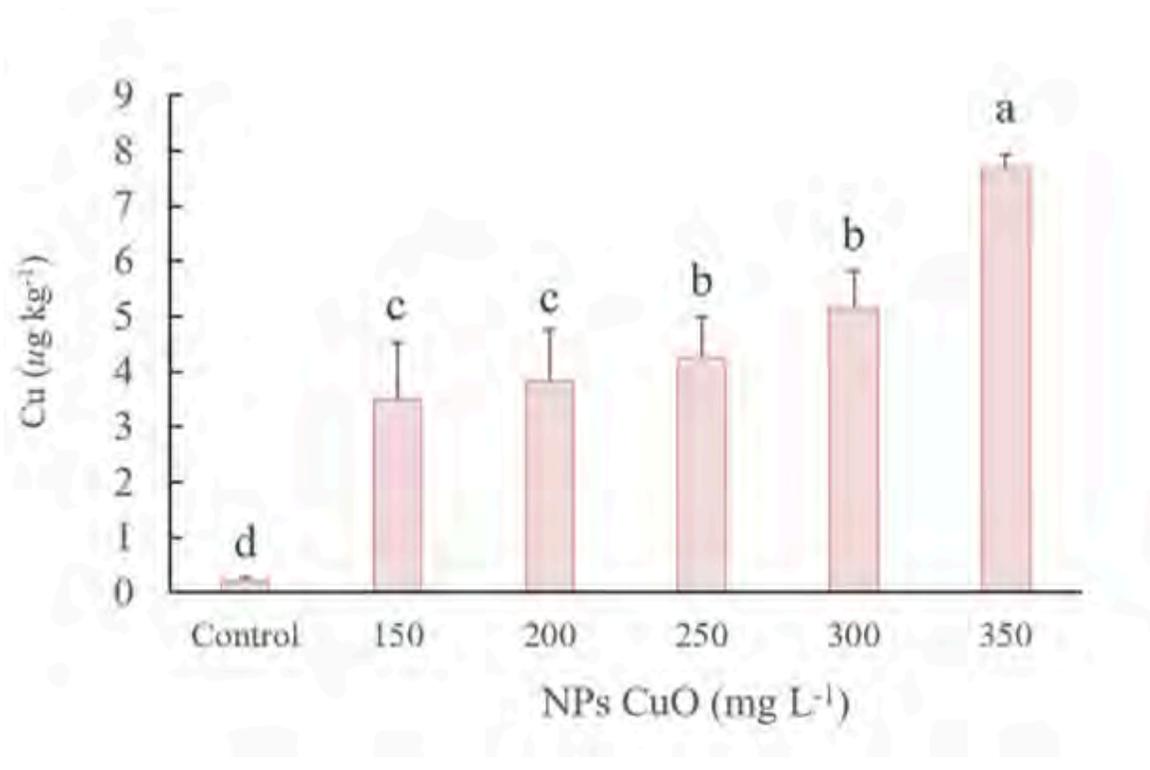
A través de este ciclo, la ascorbato peroxidasa, una enzima, aprovecha dos moléculas de ácido ascórbico para transformar el H₂O₂, una sustancia potencialmente perjudicial, en agua y monodehidroascorbato (MDA) (Hernández-Hernández *et al.*, 2019). Por ende, un incremento en la disponibilidad de cobre podría, de manera potencial, aumentar la actividad enzimática de la deshidroascorbato deshidrogenasa. En cuanto a las nanopartículas de óxido de cobre, estas podrían permitir que la entrega de cobre a la planta sea más eficaz y regulada, limitando la toxicidad del cobre cuando se aplica en cantidades excesivas (Juárez-Maldonado *et al.*, 2018).

Contenido de Cu en pulpa

El Cu, es uno de los oligoelementos esenciales para el ser humano, este se absorbe a través de la dieta en el intestino delgado y se integra rápidamente en la circulación, asociándose con largas proteínas, las cuales desempeñan un papel importante en la función y el mantenimiento del sistema inmunitario (Raha *et al.*, 2020). Los resultados obtenidos muestran que el contenido de cobre en la pulpa de los frutos de melón aumentó a medida que aumentaron las dosis aplicadas (Figura 1).



Figura 1. Efecto de la aspersión foliar NPs CuO sobre su acumulación en pulpa de melón. Medias con letras distintas en la misma columna son estadísticamente diferentes (Tukey $p \leq 0.05$); $n = 6 \pm$ desviación estándar.



Debido a que las NPs de CuO pueden penetrar al interior de la planta y moverse a través del floema y transportarse a otros órganos (Pérez-de-Luque, 2017). Los requerimientos de Cu en la dieta de la población fluctúa entre 1 a 3 mg día⁻¹ para evitar alguna deficiencia, con una dosis media recomendada de 1 200 µg día⁻¹ (Al-Hakkani, 2020), por lo cual bajo las condiciones de este estudio no existe riesgo al consumir y podría ser una alternativa efectiva para enriquecer con Cu a los frutos de melón (Al-Hakkani, 2020).

Conclusiones

La aspersión de foliar de 150 mg L⁻¹ de NPs CuO mejora el rendimiento e induce una acumulación de compuestos bioactivos y de Cu en la pulpa de los frutos de melón. Dosis altas de NPs CuO disminuyen el rendimiento y la síntesis de compuestos fitoquímicos debido a la acumulación de cobre en los frutos. No se recomienda la aplicación de dosis altas de NPs CuO, ya que se provoca una sobreproducción especies reactivas de oxígeno provocando un estrés celular afectando el rendimiento y la calidad nutracéutica.

Bibliografía

- 1 AOAC. 1990. Association of Official Analytical Chemists. Official Methods of Analysis, 15th Ed. Association of Official Analytical Chemists: Washington, DC, USA. 2:910-928.
- 2 Ahmed, B. A.; Saghir, M. K. and Musarrat, J. 2018. Toxicity assessment of metal oxide nanopollutants on tomato (*Solanum lycopersicon*): a study on growth dynamics and plant cell death. Environ. Pollut. 240(1):802-816.
- 3 Al-Hakkani, M. F. 2020. Biogenic copper nanoparticles and their applications: a review. SN Applied Sciences. 2(3):1-20. Doi.org/ 10.1007/s42452-020-2279-1.

- 4 AlQuraidi, A. O.; Mosa, K. A. and Ramamoorthy, K. 2019. Phytotoxic and genotoxic effects of copper nanoparticles in coriander (*Coriandrum sativum* Apiaceae). *Plants*. 8(1):19-31.
- 5 Amer, M. W. and Awwad, A. M. 2021. Green synthesis of copper nanoparticles by *citrus* limon fruits extract, characterization and antibacterial activity. *International Scientific Organization*. 7(1):1-8. [Doi.org/ 10.5281/zenodo.4017993](https://doi.org/10.5281/zenodo.4017993).
- 6 Brand-Williams, W.; Cuvelier, M. E. and Berset, C. L. W. T. 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *Food Science*. 28(1):25-30. [Doi.org/ 10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5).
- 7 Da-Costa, M. V. J. and Sharma, P. K. 2016. Effect of copper oxide nanoparticles on growth, morphology, photosynthesis and antioxidant response in *Oryza sativa*. *Photosynthetica*. 54(1):110-119. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0167-5>.
- 8 Davidson, K. H.; Pillai, S. S.; Nagashima, Y.; Singh, J.; Metrani, R.; Crosby, K. M.; Jifon, J.; Patil, B.; Niyakan, S.; Qian, X. and Koiwa, H. 2023. Melon (*Cucumis melo*) fruit-specific monoterpene synthase. *Molecular Horticulture*. 3(1):1-4. [Doi.org/ 10.1186/s43897-023-00051-6](https://doi.org/10.1186/s43897-023-00051-6).
- 9 Dhaliwal, S. S.; Sharma, V.; Shukla, A. K.; Verma, V.; Kaur, M.; Ondrisik, P. and Hossain, A. 2022. Biofortification is a frontier novel approach to enrich micronutrients in field crops to encounter the nutritional security. *Molecules*. 27(4):1-38. <https://doi.org/10.3390/molecules27041340>.
- 10 Esparza, R. J. R.; Stone, M. B.; Stushnoff, C. E.; Pilon, S. P. and Kendall, P. A. 2006. Effects of ascorbic acid applied by two hydrocooling methods on physical and chemical properties of green leaf lettuce stored at 5 °C. *Journal of Food Science*. 71(3):270-276. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.tb15653.x>.
- 11 Espinoza-Arellano, J. J.; Fabela-Hernández, A.; Gaytán-Mascorro, A.; Reyes-González, A y Sánchez-Toledano, B. I. 2023. Cuantificación y uso de pérdidas de alimentos: caso del melón Cantaloupe en una región del Norte Centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 14(2):159-70. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i2.2962>.
- 12 Gaytán-Alemán, L. R.; Nava-Camberos, U.; Mendoza-Pedroza, S. I.; Veliz-Deras, F. G. y Arellano-Rodríguez, G. 2021. Biofortificación con cobre en el forraje verde de trigo. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 1(1):1-10. [Doi.org/ 10.19136/era.a8n11.2885](https://doi.org/10.19136/era.a8n11.2885).
- 13 Gío-Trujillo, J. A.; Alvarado-López, C. J.; Pacheco-López, A.; Cristóbal-Alejo, J. y Reyes-Ramírez, A. 2022. Perspectivas futuras de la biofortificación de alimentos: la asociación con microorganismos del suelo. *Ra Himhai*. 18(4):175-199. [Doi.org/ 10.35197/rx.18.04.2022.08.jg](https://doi.org/10.35197/rx.18.04.2022.08.jg).
- 14 Gutiérrez-Ruelas, N. J.; Palacio-Márquez, A.; Sánchez, E.; Muñoz-Márquez, E.; Chávez-Mendoza, C.; Ojeda-Barríos, D. L. and Flores-Córdova, M. A. 2021. Impact of the foliar application of nanoparticles, sulfate and iron chelate on the growth, yield and nitrogen assimilation in green beans. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 49(3):12437. [Doi.org/ 10.15835/nbha49312437](https://doi.org/10.15835/nbha49312437).
- 15 Guo, Y.; Yu, Z.; Li, R.; Wang, L.; Xie, C. and Wu, Z. 2023. Cut-wounding promotes phenolic accumulation in *Cucumis melo* L. fruit (cv. Yugu) by regulating sucrose metabolism. *Horticulturae*. 9(258):1-15. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9020258>.
- 16 Hernández-Hernández, H.; Quiterio-Gutiérrez, T.; Cadenas-Pliego, G.; Ortega-Ortiz, H.; Hernández-Fuentes, A. D.; Fuente, M. C.; Valdés-Reyna, J. and Juárez-Maldonado, A. 2019. Impact of selenium and copper nanoparticles on yield, antioxidant system, and fruit quality of tomato plants. *Plants*. 8(10):1-17. [Doi.org/ 10.3390/plants8100355](https://doi.org/10.3390/plants8100355).
- 17 Hong, J.; Wang, L.; Sun, Y.; Zhao, L.; Niu, G.; Tan, W.; Rico, C. M.; Peralta-Videa, J. R. and Gardea-Torresdey, J. L. 2016. Foliar applied nanoscale and microscale CeO₂ and CuO alter cucumber (*Cucumis sativus*) fruit quality. *Science of the total Environment*. 563(1):904-911. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.029>.

- 18 Juárez-Maldonado, A.; Ortega-Ortíz, H.; Cadenas-Pliego, G.; Valdés-Reyna, J.; Pinedo-Espinoza, J. M.; López-Palestina, C. U. and Hernández-Fuentes, A. D. 2018. Foliar application of Cu nanoparticles modified the content of bioactive compounds in moringa oleifera lam. *Agronomy*. 8(9):1-13. <https://doi.org/10.3390/agronomy8090167>.
- 19 Juárez-Maldonado, A.; Ortega-Ortiz, H.; González-Morales, S.; Morelos-Moreno, Á.; Cabrera-de la Fuente, M.; Sandoval-Rangel, A.; Cadenas-Pliego, G. and Benavides-Mendoza, A. 2019. Nanoparticles and nanomaterials as plant biostimulants. *International Journal of Molecular Sciences*. 20(1):162-179. <https://doi.org/10.3390/ijms20010162>.
- 20 Kalisz, A.; Húska, D.; Jurkow, R.; Dvořák, M.; Klejdus, B.; Caruso, G.; and Škara, A. 2021. Nanoparticles of cerium, iron, and silicon oxides change the metabolism of phenols and flavonoids in butterhead lettuce and sweet pepper seedlings. *Environmental Science: Nano*. 8(7):1945-1959. Doi.org/ 10.1039/d1en00262g.
- 21 Kubo, K.; Pritchard, B.; and Phyto, A. S. 2021. How Chinese demand for fresh fruit and vegetables is creating new landscapes of rural development and vulnerability in Southeast Asia: insights from the Myanmar melon frontier. *Geoforum*. 122(1):32-40. Doi.org/ 10.1016/j.geoforum.2021.03.008. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803158-2.00025-4>.
- 22 Kumar, S. and Trivedi, P. K. 2016. Heavy metal stress signaling in plants. In *plant metal interaction*. Elsevier Inc.: New York, NY, USA. 585-597 pp.
- 23 López-Vargas, E. R.; Ortega-Ortiz, H.; Cadenas-Pliego, G.; Romenus, K. A.; Fuente, M. C.; Benavides-Mendoza, A. and Juárez-Maldonado, A. 2018. Foliar application of copper nanoparticles increases the fruit quality and the content of bioactive compounds in tomatoes. *Applied Sciences*. 8(7):2076-3417. Doi.org/ 10.3390/app8071020.
- 24 Ma, X.; Geiser-Lee, J.; Deng, Y. and Kolmakov, A. 2010. Interactions between engineered nanoparticles (ENPs) and plants: phytotoxicity, uptake and accumulation. *Science of the total Environment*. 408(1):3053-3061. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.03.031>.
- 25 Manchali, S.; Murthy, K. N.; Vishnuvardana, C. and Patil, B. S. 2021. Nutritional composition and health benefits of various botanical types of melon (*Cucumis melo* L.). *Plants*. 10(9):1-21. doi.org/ 10.3390/plants10091755.
- 26 Mosquera-Vivas, E. S.; Ayala-Aponte, A. A. and Serna-Cock, L. 2019. Ultrasonido y deshidratación osmótica como pretratamientos a la liofilización de melón (*Cucumis melo* L.). *Información Tecnológica*. 30(3):179-188. Doi.org/ 10.4067/S0718-07642019000300179.
- 27 Ortega-Ortiz, H.; Gaucin-Delgado, J. M.; Preciado-Rangel, P.; Fortis-Hernández, M.; Hernández-Montiel, L. G. and Cruz-Lázaro, E. 2022. Copper oxide nanoparticles biosynthesized improve germination and bioactive compounds in wheat sprouts. *Natulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 50(1):1-16. <https://doi.org/10.15835/nbha50112657>.
- 28 Pérez-Luque, A. 2017. Interaction of nanomaterials with plants: what do we need for real applications in agriculture? *Frontiers in Environmental Science*. 5(1):1-12.
- 29 Rajput, V. D.; Minkina, T.; Suskova, S.; Mandzhieva, S.; Tsitsuashvili, V.; Chaplugin, V. and Fedorenko, A. 2018. Effects of copper nanoparticles (CuO NPs) on crop plants: a mini review. *Bionanoscience*. 8(1):36-42. <https://doi.org/10.1007/s12668-017-0466-3>.
- 30 Raha, S.; Mallick, R.; Basak, S. and Duttaroy, A. K. 2020. Is copper beneficial for COVID-19 patients? *Medical Hypotheses*. 142(1):109814. Doi.org/ 10.1016/j.mehy.2020.109814.
- 31 Rivera-Gutiérrez, R. G.; Preciado-Rangel, P.; Fortis-Hernández, M.; Yescas-Coronado, P. y Orozco-Vidal, J. A. 2021. Nanopartículas de óxido de zinc y su efecto en el rendimiento y calidad de melón. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 12(5):791-803. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i5.2987>.
- 32 SIAP. 2021. Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Servicio de Información Estadística Agroalimentaria y Pesquera. <https://www.gob.mx/siap/>.

- 33 Shabbir, Z.; Sardar, A.; Shabbir, A.; Abbas, G.; Shamshad, S.; Khalid, S.; Natasha, M. G.; Dumat, C. and Shahid, M. X. 2020. Copper uptake, essentiality, toxicity, detoxification and risk assessment in soil-plant environment. *Chemosphere*. 259(11): 4-35. [Doi.org/ 10.1016/j.chemosphere.2020.127436](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127436).
- 34 Taylor, A. A.; Tsuji, J. S.; Garry, M. R.; McArdle, M. E.; Goodfellow, W. L.; Adams, W. J. and Menzie, C. A. 2020. Critical review of exposure and effects: implications for setting regulatory health criteria for ingested copper. *Environmental Management*. 65(1):131-159. [Doi.org/ 10.1007/s00267-019-01234-y](https://doi.org/10.1007/s00267-019-01234-y).
- 35 Wahab, A.; Mushtaq, K.; Borak, S. G. and Bellam, N. 2020. Zinc-induced copper deficiency, sideroblastic anemia, and neutropenia: a perplexing facet of zinc excess. *Clinical Case Reports*. 8(9):1666-1671. [Doi.org/ 10.1002/ccr3.2987](https://doi.org/10.1002/ccr3.2987).
- 36 Wang, Y.; Chantreau, M.; Sibout, R. and Hawkins, S. 2013. Plant cell wall lignification and monolignol metabolism. *Frontiers in plant science*. 4(1):1-30. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00220>.



La biofortificación con nanopartículas de cobre mejora el rendimiento y compuestos bioactivos en frutos de melón

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 01 September 2024
Date accepted: 01 November 2024
Publication date: 11 January 2025
Publication date: Nov-Dec 2024
Volume: 15
Issue: 8
Electronic Location Identifier: e3851
DOI: 10.29312/remexca.v15i8.3851

Categories

Subject: Artículo

Palabras clave:

Palabras clave:

Cucumis melo L.
antioxidantes
nano-biofortificación

Counts

Figures: 1
Tables: 2
Equations: 0
References: 36
Pages: 0