

USO DE NANOPARTÍCULAS EN SISTEMAS AGRÍCOLAS

Irving Aguilar-Hernández¹, Zaira Citlali López-Patricio¹, Gustavo Mercado-Mancera^{2*},
Jesús Abraham Méndez-Albores² y Alma Guadalupe Vázquez-Durán²

¹*Licenciatura de Ingeniería Agrícola. FES-C, UNAM*

²*Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM*

*gmercado@unam.mx

Resumen

En la industria agrícola y alimentaria, el uso de la nanotecnología es una de las áreas de investigación en nanociencia en crecimiento, para lo cual se hacen estudios en campo para determinar su efectividad y mejorar las cosechas. Se evaluó el uso de nanopartículas de óxido de zinc dopadas con cobre (NPs ZnO+Cu) en los cultivos de calabaza y frijol con el objetivo de determinar su efecto en el rendimiento de las plantas. Los cultivos se desarrollaron en condiciones de temporal en el año de 2022. Se observó que su aplicación mostró un impacto positivo significativo en varios aspectos del cultivo. Se obtuvo en calabaza una longitud de guía significativamente mayor en comparación con el tratamiento sin NPs; asimismo, valores más altos en peso de fruto y diámetros ecuatoriales y polares. El rendimiento fue de 9.6 t ha⁻¹. Para el caso del frijol, no se mostraron diferencias estadísticas significativas en los componentes de rendimiento con la aplicación de NPs, el rendimiento obtenido con la aplicación de 100 mg L⁻¹ ZnO+Cu fue de 1.8 t ha⁻¹, que es mayor al promedio nacional. Se destaca el uso potencial de las NPs de ZnO+Cu en la agricultura para mejorar el crecimiento, la producción y la calidad de los cultivos. Estas nanopartículas prometen ser una herramienta para futuras estrategias de mejora agrícola y pueden contribuir a una producción más eficiente y sostenible de alimentos.

Palabras clave: Nanotecnología, frijol, calabaza, componentes de rendimiento.

Introducción

La calabaza y el frijol tienen una importancia arraigada en la cultura, la dieta y la economía de México. Estos cultivos no solo aportan nutrientes esenciales a la dieta de la población, sino que, también desempeñan un papel vital en la seguridad alimentaria y la sostenibilidad agrícola del país.

Afrontar el reto de la innovación en la producción de alimentos para alimentar a una población creciente es complejo. Lamentablemente, el uso excesivo de agroquímicos con el propósito de aumentar el rendimiento de los cultivos tiene consecuencias negativas. Esta práctica no es sostenible y degrada los ecosistemas y el suelo. Además, genera contaminación ambiental al introducir sustancias químicas perjudiciales en el entorno (Lira *et al.*, 2018). En busca de alternativas más seguras y sostenibles, la investigación en nanotecnología aplicada a la agricultura ha surgido como un campo prometedor.

En este sentido, una herramienta potencial de la nanotecnología es la aplicación de nanopartículas, las cuales son importantes por su uso potencial en resolver problemas que con productos a escala normal son muy costosos y no siempre se solucionan eficientemente, y por las implicaciones o efectos que el uso de estas tiene en procesos o fenómenos. Respecto a la producción agrícola, la premisa básica es reducir al mínimo las pérdidas y disminuir los efectos adversos en el ambiente por el uso excesivo de insumos agrícolas (Carrillo y González, 2009).

Dentro de las nanopartículas (NPs) estudiadas para su aplicación en la agricultura se encuentran las metálicas, las poliméricas, y las de óxidos metálicos. En particular, las nanopartículas de óxido de zinc han despertado un gran interés por su capacidad de mejorar la calidad y rendimiento de los cultivos. Se han aplicado en diferentes cultivos con el fin de mejorar la germinación, crecimiento y producción, además presentan propiedades antimicrobianas y antioxidantes que les permite proteger las semillas y plantas de enfermedades y estrés oxidativo. Además, su tamaño nanométrico mejora la absorción de nutrientes y agua por las raíces (Lira, 2016).

Un método utilizado para la modificación de las nanopartículas es el dopaje, el cual tiene como objetivo mejorar las propiedades físicas, químicas, eléctricas, ópticas y biológicas de las mismas (Rekha *et al.*, 2010). Actualmente, se propone al cobre como un metal de interés para dopar el óxido de zinc (Liza, 2019). El cobre es un micronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo normal de las plantas (Yruela, 2005). Este metal, por su parte, también ha reportado buenos resultados con respecto a la germinación y el aumento de vigor en plántulas de algunos cultivos como lechuga, tomate y chile (Ruiz, 2016).

Con base en los estudios realizados por diversos grupos de investigación, se deduce que el dopaje de las nanopartículas de ZnO con cobre podría potencializar sus efectos benéficos en los parámetros productivos de los cultivos. Por lo anterior, se planteó el siguiente objetivo:

Objetivo

Evaluar el uso de nanopartículas de óxido de zinc dopadas con cobre (NPs ZnO+Cu) en los cultivos de calabaza y frijol y determinar su efecto en el rendimiento de las plantas.

Materiales y métodos

Síntesis

Las nanopartículas de ZnO+Cu fueron sintetizadas empleando el método de coprecipitación. Inicialmente, se preparó una solución en etanol compuesta por 1.1 M de acetato de zinc y 0.011 M de acetato de cobre, la cual se mantuvo en agitación constante a una temperatura de 70 °C durante un lapso de 10 minutos. Posteriormente, se añadieron 10 mL de una disolución acuosa 1.2 M de NaOH a una velocidad de 0.07 mL/s, y la reacción se agitó durante 10 minutos. La muestra resultante se dejó en reposo durante 18 horas, seguido de un proceso de lavado triple del precipitado mediante ciclos de centrifugación (7000 rpm/7 minutos) y re-suspensión en agua desionizada y posteriormente en etanol. El precipitado se sometió a un proceso de secado a 170 °C durante dos horas, y el polvo resultante se homogeneizó utilizando un mortero de ágata.

Acondicionamiento

Se realizó la limpieza y desinfección de las semillas de calabaza y frijol, las cuales se lavaron y trataron con una solución de hipoclorito de sodio al 1 % durante un minuto, seguido de un enjuague con agua destilada. En cuanto al tratamiento de las semillas usando las nanopartículas de ZnO dopadas con cobre, se preparó una suspensión de dichas nanopartículas en agua desionizada, la cual fue sometida a un proceso de baño ultrasónico con una frecuencia de 25 Hz durante un período de 20 minutos. Los diferentes tratamientos empleados en el experimento fueron los siguientes: tratamiento 1 (testigo, agua desionizada); tratamiento 2 (100 mg de nanopartículas de ZnO dopado con cobre); tratamiento 3 (200 mg de nanopartículas de ZnO dopado con cobre). Para llevar a cabo el acondicionamiento de las semillas, se sumergieron 50 semillas por tratamiento en el caso de la calabaza, y 500 semillas en el caso del frijol. Estas semillas se mantuvieron en agitación constante durante un período de 24 horas a temperatura ambiente. Una vez completado el proceso de acondicionamiento, las semillas fueron trasladadas al campo para su posterior siembra.

Labor de campo

La siembra se realizó de forma manual en una superficie de 400 m² para el caso de calabaza y 144 m² para del frijol; una distancia entre surcos de 0.8 m y entre plantas de 4.0 y 0.3 m para calabaza y frijol, respectivamente. Con una densidad de población de 1,125 plantas por hectárea para calabaza y 37,500 para frijol. El deshierbe fue de forma manual. Se aplicó humus de lombriz como biofertilizante. El cultivo se condujo en condiciones de temporal.

Resultados

En la Tabla 1, se presentan los valores de los componentes del rendimiento evaluados en calabaza.

Tabla 1. Componentes del rendimiento del cultivo de calabaza. Ciclo P-V 2022. Cuautitlán Izcalli, Méx.

Tratamiento	Número de frutos por planta	Diámetro (cm)		Peso Fruto (g)	Rendimiento (t ha ⁻¹)
		Ecuatorial	Polar		
Testigo	2.4 ^a	51.5 ^a	46.9 ^a	1,555.3 ^a	9.2 ^a
100 mg ZnO+Cu L ⁻¹	1.6 ^a	54.0 ^a	49.9 ^a	1,714.8 ^a	7.3 ^a
200 mg ZnO+Cu L ⁻¹	2.1 ^a	52.0 ^a	49.2 ^a	1,688.1 ^a	9.6 ^a

Medias con la misma letra en la misma columna no son significativamente diferentes (prueba de Tukey, α 0.05).

El tratamiento testigo obtuvo la mayor cantidad de frutos por planta (2.4 frutos), pero estos fueron más pequeños y ligeros. El tratamiento con 100 mg L⁻¹ destacó por tener frutos más grandes en términos de diámetros ecuatorial (54 cm) y polar (49.9 cm), además de un mayor peso promedio (1,714.8 g).

Aunque el tratamiento con 200 mg L⁻¹ produjo una mayor diferencia numérica con un rendimiento de 9.6 t ha⁻¹, similar al tratamiento testigo con 9.2 t ha⁻¹, no se encontraron diferencias estadísticas significativas en el rendimiento entre los tratamientos.

Aunque el tratamiento testigo presentó más frutos por planta, los tratamientos con 100 mg L⁻¹ y 200 mg L⁻¹ mostraron características de frutos más grandes y un rendimiento similar.

En la Tabla 2, se presentan los valores de los componentes del rendimiento evaluados en frijol.

Tabla 2. Componentes del rendimiento del cultivo de frijol. Ciclo P-V 2022, Cuautitlán Izcalli, Méx.

Tratamiento	Número de vainas por planta (#)	Número de Semilla por vaina (#)	Peso de 100 semillas (g)	Peso hectolítrico (kg hl ⁻¹)	Rendimiento (t ha ⁻¹)
Testigo	53.2 ^a	5.2 ^a	39.6 ^a	79 ^a	2.1 ^a
100 mg ZnO+Cu L ⁻¹	46.1 ^a	5.2 ^a	40.2 ^a	78.5 ^a	1.8 ^a
200 mg ZnO+Cu L ⁻¹	42.8 ^a	5.3 ^a	40.8 ^a	78.7 ^a	1.5 ^a

Medias con la misma letra en la misma columna no son significativamente diferentes (prueba de Tukey, α 0.05).

Los resultados indicaron la ausencia de diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos aplicados. El tratamiento testigo se caracterizó por tener un mayor número de vainas por planta, mientras que en el tratamiento con 200 mg ZnO+Cu L⁻¹ se encontraron semillas más pesadas, posiblemente debido a un incremento en el crecimiento radicular. Esto es coherente con las observaciones de Estrada (2018), quien informó mayores longitudes radiculares en semillas de maíz tratadas con NPs de ZnO en comparación con las no tratadas. El aumento en el sistema radicular puede proporcionar una base más sólida para las plantas, permitiéndoles aprovechar de manera más eficiente los nutrimentos presentes en el suelo.

A pesar de estas observaciones, el tratamiento testigo logró el mayor rendimiento, lo que podría ser resultado del estrés hídrico que afectó las primeras etapas de crecimiento. Cada tratamiento experimentó problemas de germinación debido a la falta de lluvia durante los primeros cuatro días después de la siembra. A pesar de esto, las semillas del tratamiento testigo mostraron una adaptación favorable a las condiciones ambientales durante el ciclo P-V 2022.

Discusión

Los resultados obtenidos de este estudio muestran variaciones en el rendimiento de la calabaza y el frijol en respuesta a la aplicación NPs ZnO+Cu. En el caso de la calabaza, se observó una disminución en el rendimiento en el tratamiento de 100 mg ZnO+Cu L⁻¹ (T2) en comparación con el tratamiento control (T1), pasando de 9.2 t ha⁻¹ a 7.3 t ha⁻¹. Sin embargo, es interesante observar que el tratamiento de 200 mg ZnO+Cu L⁻¹ (T3) mostró un aumento significativo en el rendimiento, alcanzando 9.6 t ha⁻¹. Esta respuesta no lineal sugiere que la dosis de nanopartículas puede tener un efecto diferente en función del nivel de concentración. Por otro lado, en el caso del frijol, tanto el tratamiento de 100 mg ZnO+Cu L⁻¹ (T2) como el de 200 mg ZnO+Cu L⁻¹ (T3) experimentaron una disminución en el rendimiento en comparación con el tratamiento testigo (T1). Estos resultados apuntan hacia una tendencia general de reducción en el rendimiento del frijol en presencia de nanopartículas, aunque cabe destacar que estas diferencias no alcanzaron significancia estadística en este estudio. La divergencia en las respuestas entre la calabaza y el frijol podría atribuirse a las diferencias en sus requerimientos nutricionales y condiciones de crecimiento. La calabaza pudo haber respondido positivamente a ciertas propiedades de las nanopartículas, mientras que el fue más susceptible a las nanopartículas.

La utilización de nanopartículas de ZnO ha evidenciado impactos positivos en algunos cultivos; Rivera *et al.* (2021) reportaron una mejoría en el rendimiento y la concentración de pulpa en el cultivo de melón (*Cucumis melo* L.) cv Cruiser al aplicar 200 mg L⁻¹ de NPs ZnO. En colza (*Brassica napus* L.) y rábano (*Raphanus sativus*) se mejoró el alargamiento de la raíz de las semillas. Sin embargo, los efectos tóxicos también se registraron a altas concentraciones de nanopartículas; debido a que la mayoría de las plantas requieren solo 0.05 mg L⁻¹ de Zn en la solución del suelo para un crecimiento normal, la aplicación de niveles más altos de Zn puede provocar fitotoxicidad (Pudake *et al.*, 2019). El empleo de NPs para estimular la germinación y el vigor de las semillas, mejora el rendimiento de los cultivos aproximadamente en un 16 % con una dosis adecuada; sin embargo, el nivel de

respuesta depende del tipo de nanomaterial, su aplicación potencial y el genotipo (Buu *et al.*, 2014).

Conclusión

1. Se observó una respuesta diferente en el rendimiento para cada cultivo evaluado al aplicar NPs ZnO+Cu, y entre los tratamientos aplicados a los cultivos no se encontraron diferencias estadísticas significativas, aunque la respuesta más favorable de su aplicación fue en el cultivo de calabaza.
2. Este estudio contribuye a la comprensión de cómo las NPs ZnO+Cu y el método de aplicación pueden impactar el rendimiento de diferentes cultivos agrícolas y subraya la complejidad de los resultados en función de las condiciones y los cultivos estudiados.
3. Estos hallazgos ofrecen una base para futuras investigaciones que podrían guiar la aplicación efectiva de nanopartículas en la agricultura, considerando tanto los beneficios potenciales como los posibles desafíos en la mejora de la producción vegetal.

Agradecimientos

Al personal técnico de la Estación Meteorológica Almaraz y del Laboratorio 14 de la Unidad de Investigación Multidisciplinaria, de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Asimismo, a los programas PAPIME PE208722 y UNAM-PAPIIT IA101523 por el apoyo brindado para el desarrollo y culminación de este trabajo.

Referencias

- Buu, N.Q., Hien, D.T., Chau, N.H., Tin, T.X., Van, N.T. Duong, K.T., & Ha, H.T. (2014). Effects of nano crystalline powders (Fe, Co and Cu) on the germination, growth, crop yield and product quality of soybean (Vietnamese species DT-51). *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology* 5(1), 1-7.
DOI 10.1088/2043-6262/5/1/015016
- Carrillo, G. R. & González, C. M. (2009). La nanotecnología en la agricultura y rehabilitación de suelos contaminados. *Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 2(2), 50-63.

Lira, S. R. H., Méndez, A. B., De los Santos, V. G. & Vera, R. I. (2016). Potencial de la nanotecnología para el desarrollo de la agricultura sustentable. Recuperado el 15 de mayo de 2023, de:
<https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/336/1/Potencial%20de%20la%20Nanotecnolog%C3%ADa%20Para%20el%20Desarrollo%20de%20la%20Agricultura%20Sustentable.pdf>.

Lira, S. R. H., Méndez Argüello, B., De los Santos, V. G. & Vera, R. I. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta Universitaria*, 28(2), 9-24. Doi: 10.15174/au.2018.157

Liza, C. D. (2019). *Efecto del dopaje con cobalto o plata en las propiedades estructurales, ópticas y fotocatalíticas de nanopartículas de titanato de zinc y óxido de zinc*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Trujillo. Perú. Recuperado el 15 de mayo de 2023, de: <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/13205>

Pudake, R., Chauhan, N., & Kole, C. (2019). *Nanoscience for sustainable agriculture*. Springer International Publishing.

Rekha, K., Nirmala, M., Nair, M., & Anukaliani, A. (2010). Structure, optical, photocatalytic and antibacterial activity of zinc oxide and manganese doped zinc oxide nanoparticles. *Physica B: Condensed Matter*, 405(15), 3180-3185. Doi: 10.1016/j.physb.2010.04.042

Rivera, G. R. G., Preciado, R. P., Fortis, H. M., Betancourt, G. R., Yescas, C. P. & Orozco V. J. (2021). Nanopartículas de óxido de zinc y su efecto en el rendimiento y calidad del melón. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(5), 791-803.

Ruiz, T. N., García, L. J., Lira, S. R., Vera, R. I. & Méndez, A. B. (2016). Efecto de Nanopartículas Metálicas y Derivadas del Carbón en la Fisiología de Semillas. Recuperado el 15 de mayo de 2023, de:
<https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/330/1/Efecto%20de%20Nanopart%C3%ADculas%20Met%C3%A1licas%20y%20Derivadas%20del%20Carb%C3%B3n%20en%20la%20Fisiolog%C3%ADa%20de%20Semillas.pdf>

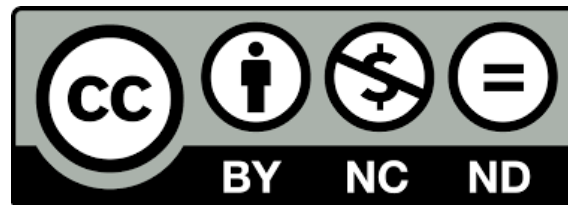
Yruela, I. (2005). Copper in plants. *Braz. J. Plant Physiol.*, 17(1), 145-156. Doi:10.1590/S1677-04202005000100012



D. R. © UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

Excepto donde se indique lo contrario esta obra está bajo una licencia Creative Commons Atribución No comercial, No derivada, 4.0 Internacional (CC BY NC ND 4.0 INTERNACIONAL).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



ENTIDAD EDITORA

Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán.

Av. Universidad 3000, Universidad Nacional Autónoma de México, C.U., Delegación Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México.

FORMA SUGERIDA DE CITAR:

Aguilar-Hernández, I., López-Patricio, Z. C., Mercado-Mancera, G., Méndez-Albores, J. A., y Vázquez-Durán, A. G. (2023). Uso de nanopartículas en sistemas agrícolas. *MEMORIAS DEL CONGRESO NACIONAL DE TECNOLOGÍA (CONATEC)*, Año 6, No. 6, septiembre 2023 - agosto 2024. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. UNAM.

https://tecnicosacademicos.cuautitlan.unam.mx/CongresoTA/memorias2023/Mem2023_Paper15-E.html