

# Cuando el tamaño importa: nanopartículas y microorganismos del suelo<sup>φ</sup>

José A. Ramos-Zapata<sup>1\*</sup>, Uriel Solís-Rodríguez<sup>1</sup>, Elizabeth Herrera-Parra<sup>2</sup>

## Introducción

El 4 de octubre de 2023 fueron anunciados los ganadores del Premio Nobel de Química, Mounqi G. Bawendi (MIT), Louis E. Brus (Universidad de Columbia) y Alexei I. Ekimov (Nanocrystals Technology Inc.). Ellos fueron reconocidos por descubrir y sintetizar los puntos cuánticos que son nanopartículas con propiedades únicas creadas en laboratorio y que miden millonésimas de milímetro.

En general, la reducción de materiales a escala nanométrica ocasiona que sus propiedades físicas y químicas se modifiquen y que sus propiedades electrónicas y ópticas cambien. Este proceso ha revolucionado las tecnologías relacionadas con la elaboración de pantallas de televisión, lámparas LED y dispositivos biomédicos (Schaefer 2010). Sin embargo, los nanomateriales son más reactivos. Un ejemplo son los polvos finos de cereales que pueden causar explosiones en silos de almacenamiento, como ocurrió en 2008 en la planta de Imperial Sugar en Georgia, Estados Unidos de Norteamérica (García *et al.* 2001). Cuando los nanomateriales se liberan al ambiente, como resultado de su producción o uso, pueden provocar una nueva dimensión e impactar los procesos ecosistémicos.

Actualmente, los nanomateriales forman parte de más de 600 productos para consumo humano y también pinturas, catalizadores y productos de cuidado personal hasta aplicaciones médicas y agrícolas. Su creciente producción (miles de toneladas métricas al año) genera residuos que terminan en agua, suelo y aire (Keller y Lazareva 2014). El objetivo de este trabajo es explorar los efectos de las nanopartículas metálicas, y de óxidos metálicos, con

<sup>φ</sup> <sup>1</sup>Departamento de Ecología Tropical, Universidad Autónoma de Yucatán. <sup>2</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Mococho, Yucatán. \*aramos@correo.uady.mx  
DOI: <http://doi.org/10.56369/BAC.6883>



énfasis en la incorporación en microorganismos del suelo debido a su uso en agricultura para incrementar la productividad.

## Nanopartículas en la agricultura

Las nanopartículas están transformando la agricultura ya que se emplean en nanosensores para optimizar riego y fertilización, también como nanoherbicidas para controlar malezas y nanofungicidas para combatir enfermedades (Santás-Miguel *et al.* 2023). Sin embargo, su aplicación más extendida es en los nanofertilizantes que vuelven a los nutrientes como fósforo, nitrógeno o plata más accesibles para las plantas, aunque bajo ciertas condiciones también los vuelven más tóxicos.

La efectividad de la nanotecnología (empleo de nanopartículas para beneficio de los humanos) en la agricultura depende de factores como el valor de pH y el potencial redox del suelo. Por ello, es esencial definir las mejores condiciones de aplicación (ya sea foliar o directamente al suelo) para evitar excesos que puedan generar impactos negativos en el ambiente (Santás-Miguel *et al.* 2023).

El riesgo principal del uso excesivo de nanopartículas es su ecotoxicidad. Debido a su tamaño, estas partículas se transportan con facilidad y pueden acumularse en algunos organismos en concentraciones mayores a las de su entorno (bioacumulación), como en los gusanos del suelo (Topuz y van Gestel 2017) y en peces carpa (Hao *et al.* 2013), amplificar efectos adversos a lo largo de la cadena trófica y ocasionar efectos perjudiciales en los ecosistemas y en la salud humana (Uddin *et al.* 2020).

Dado que el uso agrícola de nanopartículas conduce a su incorporación al suelo, éste se convierte en el receptor ambiental principal y en el escenario donde pueden manifestarse efectos no intencionados sobre los organismos (Rajput *et al.* 2018).

---

*“Las nanopartículas están transformando la agricultura ya que se emplean en nanosensores para optimizar riego y fertilización, también como nanoherbicidas para controlar malezas y nanofungicidas para combatir enfermedades.”*

---

## Interacción de nanopartículas con microorganismos del suelo

El suelo es un ambiente dinámico compuesto por minerales, materia orgánica, agua, aire y una red de microorganismos que sostienen la fertilidad de los ecosistemas (Tate 2021). Los microorganismos del suelo, como bacterias y hongos, cumplen funciones esenciales en los ciclos del carbono, nitrógeno y fósforo, y pueden ser grandes aliados del crecimiento vegetal (Gianinazzi *et al.* 2010). La introducción de nanopartículas al suelo puede impactar a dichos microorganismos y a su vez modificar el equilibrio natural.

Debido a su tamaño, las nanopartículas pueden interactuar directamente con los microorganismos y, dependiendo del tipo de nanopartícula, su concentración y las condiciones del suelo, sus efectos pueden ser dañinos (Palencia *et al.* 2013). Por ejemplo, los óxidos metálicos, como zinc (ZnO) y titanio (TiO<sub>2</sub>), pueden generar especies reactivas de oxígeno (relacionadas con el envejecimiento celular) capaces de dañar las membranas de los microorganismos, sus enzimas y su material genético, y provocar cambios que comprometan su viabilidad (Palencia *et al.* 2013).

El efecto dañino de las nanopartículas es aún más relevante sobre los microorganismos benéficos del suelo. Por ejemplo, las nanopartículas pueden afectar a los hongos micorrízicos arbusculares (HMAs) que forman simbiosis (micorriza arbuscular) con la mayoría de las plantas y facilitan la absorción de nutrientes esenciales, o bien afectar a las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (BPCVs) que aportan beneficios como fijación de nitrógeno de la atmósfera o producción de fitohormonas que estimulan la producción vegetal (Tian *et al.* 2019).

Las nanopartículas de plata reducen la colonización de HMAs en raíces y las nanopartículas de óxido de cobre (CuO) disminuyen la actividad metabólica de las BPCVs (Tian *et al.* 2019). Sin embargo, en condiciones controladas, algunas nanopartículas en dosis bajas estimulan la actividad microbiana al servir como fuente de nutrientes, por lo que la relación entre nanopartículas y microorganismos es ambivalente (He *et al.* 2016). Puede convertirse en un riesgo para el funcionamiento de los ecosistemas o en una herramienta valiosa para potenciar la productividad agrícola, dependiendo de cómo y cuánto se aplique. Ahí radica la importancia de su estudio y comprensión antes de utilizarlas de manera indiscriminada.

---

*“Debido a su tamaño, las nanopartículas pueden interactuar directamente con los microorganismos y, dependiendo del tipo de nanopartícula, su concentración y las condiciones del suelo, sus efectos pueden ser dañinos.”*

---

## Microorganismos benéficos del suelo para plantas resistentes a toxicidad por nanopartículas

La asociación de las plantas con los HMAs para formar la micorriza arbuscular incrementa la tolerancia de las plantas ante efectos fitotóxicos de nanopartículas, lo que resalta su uso potencial en estrategias de fitorremediación (Yang *et al.* 2023). Sin embargo, los efectos directos de las nanopartículas sobre los propios HMAs pueden ser nocivos y aún siguen siendo poco claros y, en muchos casos, contrastantes.

Se ha observado que algunas nanopartículas pueden favorecer la interacción planta-HMAs en condiciones específicas. Las nanopartículas de hierro y plata en bajas concentraciones aumentan la colonización de las raíces por HMAs en plantas de trébol (Feng *et al.* 2013). En contraste, hay una disminución en la colonización de especies de HMAs en plantas de girasol (Dubchak *et al.* 2010) y haba (Abd-Alla *et al.* 2016), tras exponerse a nanopartículas de titanio (Ti) y plata (Ag), así como en plantas de maíz a dosis elevadas de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) (Wang *et al.* 2016). Estos hallazgos evidencian la necesidad de ampliar la investigación hacia variables estructurales y funcionales para comprender de manera integral cómo las nanopartículas influyen en el papel ecológico de los HMAs.

Solís-Rodríguez *et al.* (2024) encontraron que las plantas asociadas con HMAs toleran la presencia de una concentración elevada de nanopartículas de ZnO en el suelo (Fig. 1). Las plantas micorrizadas tuvieron mejor crecimiento, mayor producción de frutos, mayor estabilidad fisiológica y reducción de efectos tóxicos de las nanopartículas, en comparación con plantas sin micorrizas. Estos resultados sugieren una protección asociada a la micorrización y es consistente con la hipótesis de que las hifas de los hongos podrían actuar como una barrera y limitar la entrada de nanopartículas en exceso a los tejidos vegetales. Además, esta asociación produjo una mejoría en nutrición y vigor a la planta para resistir el estrés mediante el estímulo de sistemas antioxidantes, ayudándolas a neutralizar el daño celular. La micorriza puede alterar las propiedades químicas y biológicas del suelo cercano a la raíz, reduciendo la biodisponibilidad y toxicidad de diferentes tipos de contaminantes.

Los HMAs no solo son importantes para la nutrición vegetal, sino que pueden desempeñar un papel clave en la mitigación de contaminantes emergentes como las nanopartículas metálicas y de óxidos metálicos (Solís-Rodríguez *et al.* 2024). Debido a que la nanotecnología sigue en expansión, es fundamental comprender cómo los organismos del suelo interactúan con las nanopartículas, lo que implica que muchas soluciones a los problemas ambientales ya existen en la naturaleza.



Figura 1. Papel protector de la micorriza arbuscular en plantas de chile habanero expuestas a nanopartículas de Zinc. Se registró una respuesta positiva en el crecimiento y producción. Imagen editada con DALL-E 5.2 (Open AI).

## Riesgo ecológico y regulaciones

A pesar de los beneficios de las nanopartículas, su uso plantea riesgos ecológicos ya que su toxicidad depende de su composición química, tamaño, forma, carga superficial y solubilidad y de las condiciones ambientales. Las regulaciones sobre el uso de nanopartículas en productos comerciales aún están en desarrollo en muchas partes del mundo. En Norteamérica, la regulación se ha construido principalmente a partir de marcos normativos diseñados para sustancias químicas convencionales, pero cuenta con programas y autoridades que permiten la evaluación obligatoria de nanomateriales caso por caso, aunque sin incorporar las particularidades asociadas al tamaño nanométrico y su comportamiento ambiental (Stretz *et al.* 2013; Environment and Climate Change Canada and Health Canada, 2017).

En América Latina, la situación es más incipiente y heterogénea. En la mayoría de los países no existen mecanismos regulatorios específicos ni programas formales de evaluación para nanomateriales, por lo que el uso de nanopartículas queda sujeto a legislaciones generales sobre otros tipos de químicos (Chávez-Hernández *et al.* 2024). En contraste, la Unión Europea a través de su programa REACH, ha establecido lineamientos específicos para evaluar los riesgos asociados con nanomateriales. Sin embargo, la implementación de estas regulaciones enfrenta retos debido a la complejidad de los estudios toxicológicos a escala nanométrica (Maynard *et al.* 2011).

---

*“A pesar de los beneficios de las nanopartículas, su uso plantea riesgos ecológicos ya que su toxicidad depende de su composición química, tamaño, forma, carga superficial y solubilidad y de las condiciones ambientales.”*

---

## Conclusión

Las nanopartículas son una herramienta poderosa con aplicaciones revolucionarias en diversos campos. Sin embargo, su impacto en los microorganismos del suelo y el ecosistema en general no debe ser subestimado. La investigación científica y la regulación adecuada son esenciales para garantizar que estas tecnologías se utilicen de manera responsable y sostenible. Desde una perspectiva aplicada, los hongos micorrízicos arbusculares en suelos agrícolas podrían ser una estrategia natural, sostenible y de bajo costo, para reducir los riesgos ambientales asociados al uso de nanopartículas. Esto es especialmente relevante para la agricultura del futuro que debe enfrentar simultáneamente el aumento de la contaminación y la necesidad de producir alimentos de manera sostenible sin comprometer la salud del planeta.

## Referencias

- Abd-Alla MH, Nafady NA y Khalaf DM. 2016. Assessment of silver nanoparticles contamination on faba bean-*Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae*-*Glomus aggregatum* symbiosis: Implications for induction of autophagy process in root nodule. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 218(15):63-177. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.11.022>.
- Chávez-Hernández JA, Velarde-Salcedo AJ, Navarro-Tovar G y Gonzalez C. 2024. Safe nanomaterials: from their use, application, and disposal to regulations. *Nanoscale Advances* 6:1583-1610. <https://doi.org/10.1039/d3na01097j>.

- Dubchak S, Ogar A, Mietelski JW y Turnau K. 2010. Influence of silver and titanium nanoparticles on arbuscular mycorrhiza colonization and accumulation of radiocaesium in *Helianthus annuus*. Spanish Journal of Agricultural Research 8(S1):103-108. <https://doi.org/10.5424/sjar/201008s1-1228>.
- Environment and Climate Change Canada & Health Canada (2017). Guidance document: new substances notification regulations (chemicals and polymers). Government of Canada. Fecha de consulta 1/12/2025 en <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/managing-pollution/evaluating-new-substances/chemicals-polymers/guidance.html>
- Feng Y, Cui X, He S, Dong G, Chen M, Wang J y Lin X. 2013. The role of metal nanoparticles in influencing arbuscular mycorrhizal fungi effects on plant growth. Environmental Science and Technology 47(16):9496-9504. <https://doi.org/10.1021/es402109n>.
- García J F, Rodríguez PA y Téllez FA. 2001. Las explosiones de polvo en los silos agrícolas. Mapfre Seguridad 82:25-36.
- Gianinazzi S, Gollotte A, Binet MN, van Tuinen D, Redecker D y Wipf D. 2010. Agroecology: the key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services Mycorrhiza 20(8):519-530. <https://doi.org/10.1007/s00572-010-0333-3>.
- Hao L, Chen L, Hao J y Zhong N. 2013. Bioaccumulation and sub-acute toxicity of zinc oxide nanoparticles in juvenile carp (*Cyprinus carpio*): a comparative study with its bulk counterparts. Ecotoxicology and Environmental Safety 91:52-60. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.01.007>.
- He S, Feng Y, Ni J, Sun Y, Xue L, Feng Y, Yua Y, Lin X, y Yang L. 2016. Different responses of soil microbial metabolic activity to silver and iron oxide nanoparticles. Chemosphere 147:195-202. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.12.055>.
- Keller AA y Lazareva A. 2014. Predicted releases of engineered nanomaterials: from global to regional to local. Environmental Science & Technology Letters 1(1):65-70. <https://doi.org/10.1021/ez400106t>.
- Maynard AD, Warheit DB y Philbert MA. 2011. The new toxicology of sophisticated materials: nanotoxicology and beyond, Toxicological Sciences 120(S1):S109-S129. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfq372>.
- Palencia SL, Combatt EM y Palencia MS. 2013. Toxicidad de nanopartículas inorgánicas sobre los microorganismos del suelo con importancia agrícola: una revisión. Temas Agrarios 18(2):106-122. <https://doi.org/10.21897/rta.v18i2.720>.
- Rajput VD, Minkina T, Sushkova S, Tsitsuashvili V, Mandzhieva S, Gorovtsov A, Nevidomskyaya D y Gromakova N. 2018. Effect of nanoparticles on crops and soil microbial communities. Journal of Soils and Sediments 18:2179-2187. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1793-2>.
- Santás-Miguel V, Arias-Estévez M, Rodríguez-Seijo A y Arenas-Lago D. 2023. Use of metal nanoparticles in agriculture. A review on the effects on plant germination. Environmental Pollution 334: 122222. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122222>.
- Schaefer HE. 2010. Nanoscience the Science of the Small in Physics, Engineering, Chemistry, Biology and Medicine (1a ed.). Springer. Berlin. 772 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-10559-3>.
- Solís-Rodríguez U, Chávez-Vergara B, Trejo-Tzab R, Rosas-Sánchez D, Herrera-Parra E y Ramos-Zapata JA. 2024. Effect of zinc oxide nanoparticles and inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi on growth, yield, and antioxidant capacity of *Capsicum chinense* Jacq. (Habanero pepper). Journal of Nanoparticle Research 26(7): 139. <https://doi.org/10.1007/s11051-024-06049-5>.

- Stretz HA, Ambuken PV, Kumar G, Rabbani Esfahani M y Pallem V. 2013. Regulatory and environmental issues of nanotechnology safety. En: Asmatulu R (ed.) Nanotechnology Safety. Elsevier. USA. pp. 43-56.
- Tate R. 2021. Soil microbiology. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc. Alemania. 592 pp.
- Tian H, Kah M y Kariman K. 2019. Are nanoparticles a threat to mycorrhizal and rhizobial symbioses? a critical review. *Frontiers in Microbiology* 10:1660. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01660>.
- Topuz E y van Gestel CAM. 2017. The effect of soil properties on the toxicity and bioaccumulation of Ag nanoparticles and Ag ions in *Enchytraeus crypticus*. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 144:330-337. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.06.037>.
- Uddin, MN, Desai F y Asmatulu E. 2020. Engineered nanomaterials in the environment: bioaccumulation, biomagnification and biotransformation. *Environmental Chemistry Letters* 18:1073-1083. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00947-0>.
- Wang F, Liu X, Shi Z, Tong R, Adams CA y Shi X. 2016. Arbuscular mycorrhizae alleviate negative effects of zinc oxide nanoparticle and zinc accumulation in maize plants - a soil microcosm experiment. *Chemosphere* 147:88-97. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.12.076>.
- Yang D, Wang L, Ma F, Wang G y You Y. 2023. Effects of Ag nanoparticles on plant growth, Ag bioaccumulation, and antioxidant enzyme activities in *Phragmites australis* as influenced by an arbuscular mycorrhizal fungus. *Environmental Science and Pollution Research* 30:4669-4679. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22540-9>.

Ramos-Zapata JA, Solís-Rodríguez U, Herrera-Parra E. 2026. Cuando el tamaño importa: nanopartículas y microorganismos del suelo. *Bioagrobiencias* 19 (1): 100-107. DOI: <http://doi.org/10.56369/BAC.6883>

ISSN 2007 - 431 X