

## ¿Es posible “jaquear” el suelo y las plantas?

Susana Rodríguez-Jurado<sup>1</sup> y Ana Angélica Feregrino-Pérez<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro

\* Dirección para correspondencia: [feregrino.angge@hotmail.com](mailto:feregrino.angge@hotmail.com)

El cuerpo humano está integrado por una compleja red de sistemas y órganos con tareas específicas que le permiten su correcto funcionamiento. Además, la salud del cuerpo humano también está ligada a una compleja red de pequeños seres vivos; estos son invisibles al ojo humano, pero ejercen un papel fundamental en su funcionamiento. Por ejemplo, el proceso de digestión de alimentos requiere la participación de millones de microorganismos, a los que se denomina microbiota intestinal; la diversidad de los microorganismos y su funcionalidad determina en gran medida la salud humana. Algo similar sucede con el suelo y las plantas; en ellos habitan millones de microorganismos, los cuales impactan directamente en su desarrollo, rendimiento y calidad. Sin embargo, estos pequeños seres enfrentan grandes desafíos, tales como el clima o el uso de agroquímicos convencionales, es decir, fertilizantes, pesticidas y bioestimulantes que se emplean para potenciar el desempeño de los cultivos.

Recientemente, se ha comenzado a emplear agroquímicos de última generación, a los cuales se les conoce como nanoagroquímicos. Los nanoagroquímicos son agroquímicos con tamaños muy pequeños (con al menos una dimensión entre 1-100 nanómetros), conocidos como nanomateriales, es decir,

materiales entre 10 y 100 veces más pequeños que los microorganismos. Bajo estas condiciones, los nanoagroquímicos podrían “jaquear” (introducirse de forma no autorizada) el sistema planta-microbiota-suelo. Al penetrar los tejidos de las plantas o microorganismos, solo tomando ventaja de su tamaño y sus propiedades físicas y químicas para modificar el metabolismo e incluso las propiedades naturales del suelo. Por ello, la presencia de nanoagroquímicos (nanofertilizantes, nanopesticidas o nanobioestimulantes) en los ecosistemas podría jaquear las plantas, el suelo y la compleja arquitectura de comunidades microbianas que los habitan.

## **El suelo está cansado**

En las últimas décadas, como resultado de la revolución verde, se ha intensificado el uso de agroquímicos como fertilizantes, bioestimulantes y pesticidas químicos e inorgánicos. El uso de estos agroquímicos ha generado como resultado inmediato un incremento en la productividad de los cultivos. Sin embargo, a través de los años, este efecto se ha revertido; se ha observado que estos compuestos provocan contaminación, infertilidad de los suelos y reducción en la diversidad y cantidad de microorganismos (Romero *et al.*, 2023). Todo esto ha traído como consecuencia la constante disminución de la productividad y calidad de los cultivos. Lo anterior sugiere que ya no es suficiente el uso de agroquímicos convencionales para producir alimentos, ya que cada día se reduce más la productividad y calidad de los cultivos; en este caso también se incrementa el impacto al medio ambiente por el

uso desmedido de los mismos. Consecuentemente, el proceso de producción de alimentos requiere establecer nuevas estrategias de producción que reduzcan la contaminación de suelos, los efectos negativos en las redes microbianas y, por consiguiente, el impacto negativo en el ecosistema planta-microorganismos-suelo. En este contexto, los nanoagroquímicos podrían ser el agente de cambio que se requiere para jaquear y reactivar el suelo y, por consiguiente, producir cultivos con altos rendimientos en productividad y calidad, reduciendo los daños al suelo, las plantas y sus microorganismos. Hasta el momento, diversos nanoagroquímicos han reportado efectos (positivos y negativos) en el suelo y las plantas que se asocian a sus propiedades fisicoquímicas, como su tamaño diminuto, forma y tipo de nanomaterial utilizado, entre otras.

## **Efectos de los nanoagroquímicos en plantas**

Particularmente en las plantas, el uso de nanoagroquímicos ha generado incremento en el rendimiento de cultivos, así como en la capacidad de defensa de las plantas ante sequía o salinidad u otras condiciones de estrés; incluso, el uso de nanoagroquímicos puede reducir el empleo de agroquímicos convencionales, debido a su capacidad para mejorar la absorción de nutrientes o reducir el uso de pesticidas en el control de plagas y enfermedades. Por ejemplo, la aplicación del nanoagroquímico de óxido de hierro recubierto de cisteína generó un incremento significativo en el rendimiento del cultivo de fresa; en este caso en particular,

también se incrementaron los sólidos solubles totales (azúcares, ácidos, vitaminas y minerales), antocianinas, fenoles, flavonoides (metabolitos secundarios que le confieren a la fresa el potencial como alimento funcional o beneficioso para la salud), así como la capacidad antioxidante (Azizkhani *et al.*, 2023).

Por otra parte, en el cultivo de berenjena la aplicación de nanosilicio redujo el daño por estrés hídrico; también se observó un incremento en el crecimiento y rendimiento del cultivo, ya que el nanosilicio maximizó la eficiencia de absorción de calcio, magnesio, potasio y silicio (Younes *et al.*, 2024). Incluso, en un cultivo de jitomate infectado con el hongo *Fusarium oxysporum*, la aplicación de nanoplata redujo la intensidad del daño por marchitez entre 20 y 35 % bajo estas condiciones particulares. Además, el uso de este nanoagroquímico incrementó el tamaño, peso, número de frutos y cantidad de compuestos bioactivos (Ashraf *et al.*, 2025). Lo anteriormente expuesto posiciona a los nanoagroquímicos con potencial multifuncional en la agricultura.

Los nanoagroquímicos actúan como bioestimulantes al promover el crecimiento y rendimiento de las plantas; además, estos también muestran una mayor efectividad respecto al uso de fertilizantes convencionales, por lo que se podría reducir el uso de estos. Los estudios muestran que los nanoagroquímicos actúan como pesticidas reduciendo significativamente los daños y la gravedad de enfermedades. Entonces, la intrusión de los nanoagroquímicos en las plantas podría contribuir a jaquear las plantas y reprogramar su metabolismo primario (al potenciar su rendimiento) o secundario (al activar el sistema de defensa de la planta)

y propiciar así un mejor desempeño generalizado de las plantas en su ambiente natural.

## **Efectos de los nanoagroquímicos en microorganismos**

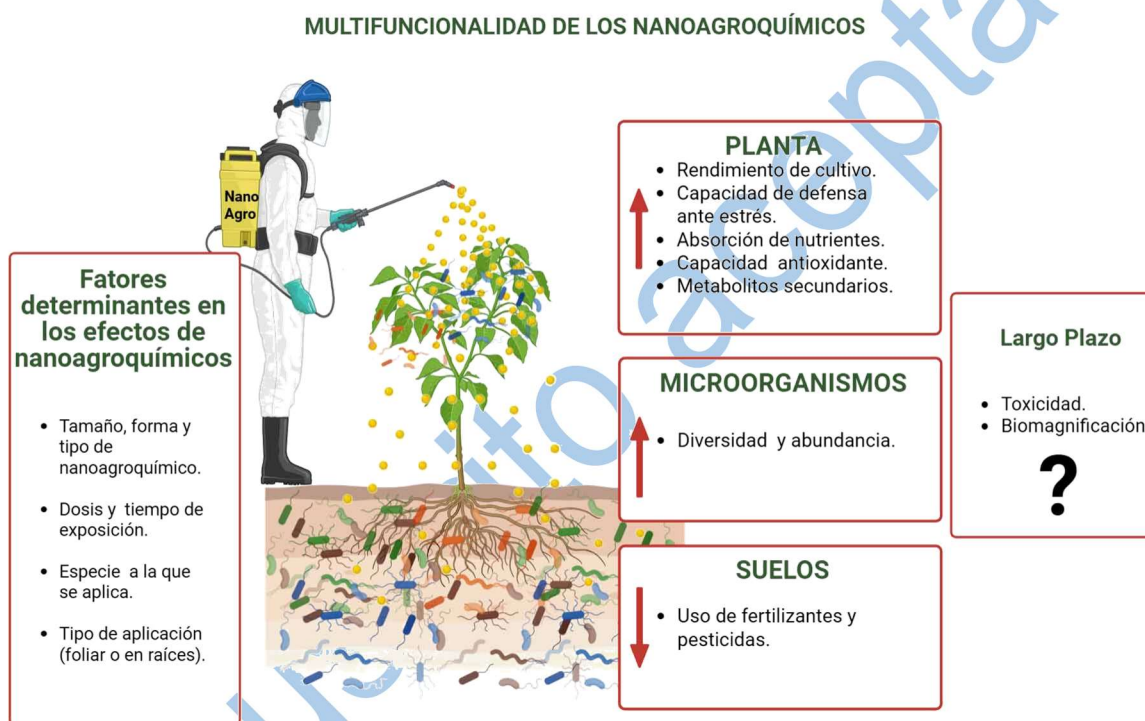
Es importante mencionar que los efectos de los nanoagroquímicos no se restringen a las plantas. Existe evidencia científica que demuestra que la interacción de estos con el suelo puede modificar las comunidades microbianas que lo habitan. Por ejemplo, en un suelo de jardín se aplicaron nanoagroquímicos de óxido de cobre, óxido de hierro y óxido de plata. Posteriormente se encontró que la presencia de estos compuestos altera la composición de las comunidades bacterianas; esto causa una reducción significativa en su diversidad y cantidad debido a la exposición prolongada (Egboluche *et al.*, 2022). Estos efectos fueron observados en suelos sin ningún agente de contaminación adicional; sin embargo, en suelos contaminados los efectos observados fueron diferentes. En un suelo contaminado por microplásticos se aplicaron nanopartículas de óxido de hierro. En consecuencia, se observó un aumento en la diversidad bacteriana, mientras que la abundancia se incrementó casi un tercio en comparación con el suelo contaminado sin la presencia del nanoagroquímico. Posteriormente, se plantó raigrás sin adicionar más nanoagroquímicos. Se observó una intensificación en las redes de colaboración entre comunidades bacterianas (17 %) en el sistema suelo-microbiota-planta; este resultado preliminar posibilita el uso de nanoagroquímicos como un potencial

método para mitigar los efectos nocivos de la acumulación de microplásticos en los suelos (Liu *et al.*, 2023). Sin embargo, en otra investigación se aplicaron nanopartículas de óxido de zinc y microplásticos en el suelo, observándose que ambos interactúan potenciándose recíprocamente; esto alteró significativamente los tipos de microorganismos presentes, su información genética y sus funciones en el suelo. En consecuencia, es importante considerar las interacciones de contaminantes en las evaluaciones de riesgos ecológicos. Por otro lado, las dosis más altas de microplásticos y nanoagroquímicos de óxido de zinc redujeron la expresión de genes en los microorganismos que degradan el carbono y participan en el ciclo del nitrógeno; sin embargo, con esa dosis se mejoró la fijación de dióxido de carbono y el metabolismo del azufre (Sun *et al.*, 2025). Lo anterior confirma que las concentraciones son un factor determinante en los efectos de los nanoagroquímicos en la agricultura.

## **No todo lo pequeño es bueno**

Hasta este punto se ha revisado la multifuncionalidad de los nanoagroquímicos (Figura 1). Sin embargo, no todo lo relacionado con los nanoagroquímicos es bueno. Los efectos de los nanoagroquímicos dependen de varios factores, tales como su forma, tamaño, dosis, tiempo de exposición, especies a las que se aplican, o el tipo de nanomaterial utilizado; incluso, los efectos de los nanoagroquímicos también dependen de la forma de aplicación (foliar o en las raíces) (Aqeel *et al.*, 2022). Por

lo tanto, el tamaño sí importa: entre más pequeños sean los nanoagroquímicos, mayor reactividad tienen. Además, a mayor dosis o tiempo de exposición de los nanoagroquímicos, los efectos positivos se pueden transformar en intoxicación para las plantas y otros seres vivos que interactúan con ellas llevándolas incluso a la muerte (Rodríguez-Jurado *et al.*, 2025).



**Figura 1.** Potencial multifuncional de los nanoagroquímicos y los factores determinantes en sus efectos. Creada en BioRender.

Se debe considerar que la aplicación de nanoagroquímicos podría beneficiar a las plantas en variables de importancia como su rendimiento, pero los efectos tóxicos podrían causar la muerte o incluso moverse entre los niveles de la cadena alimenticia. Por ejemplo, si un animal consume una planta a la cual se aplicaron

nanoagroquímicos, y después ese animal es consumido por un humano, se puede generar un efecto de biomagnificación; este término hace referencia al hecho de que las concentraciones de los nanoagroquímicos no solo permanezcan en la planta donde originalmente se aplicaron, sino que aumenten conforme se mueven entre los niveles de la cadena alimenticia (Acosta-Lizárraga *et al.*, 2026). Esto necesariamente implica que los nanoagroquímicos no solo tienen potencial para jaquear la planta al entrar sin permiso en ella y modificar su metabolismo, sus genes e incluso sus funciones, sino que pueden jaquear otros organismos cuando estos últimos se alimentan de especies que previamente estuvieron en contacto con nanoagroquímicos.

## Conclusión

Se puede concluir que los nanoagroquímicos sí pueden “jaquear” al suelo y las plantas, ya que sus propiedades les confieren la capacidad de entrar a las células y contribuir a reprogramar su metabolismo. Sin embargo, los efectos de los nanoagroquímicos son parcialmente conocidos; estos, en su mayoría, han sido probados a pequeña escala o a nivel de laboratorio, por lo que sus efectos a largo plazo aún no se han explorado del todo. Hasta el momento no hay consenso respecto a los efectos de los nanoagroquímicos, a pesar de que estos muestran un gran potencial para su uso en la agricultura. No obstante, es necesario continuar

investigando para determinar los intervalos seguros de aplicación no solo para la planta sino para todos los seres vivos que interactúan con ellos.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Innovación y Tecnología, así como de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro a través de las becas de manutención y de colegiaturas otorgadas a Susana Rodríguez Jurado (número de solicitud Rizoma 67dde39d2718937e4b51dbbc) para la realización de sus estudios de posgrado.

## Referencias

Acosta-Lizárraga LG, Rodríguez-Jurado S, Bergés-Tiznado ME *et al.* (2026). Biomagnification of Potentially Toxic Elements and Metal-Based Nanomaterials in Food. *Environments* 13:116. DOI: <https://doi.org/10.3390/environments13020116>.

Aqeel U, Aflab T, Khan MMA *et al.* (2022). A comprehensive review of impacts of diverse nanoparticles on growth, development and physiological adjustments in plants under changing environment. *Chemosphere* 291(1). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132672>.

Ashraf H, Anjum T, Ahmad IS *et al.* (2025). Phytofabricated silver nanoparticles unlock new potential in tomato plants by combating wilt infection and enhancing plant growth. *Scientific Reports* 15(1):10527. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89724-4>.

Azizkhani S, Javadi T, Ghaderi N and Farzinpour A (2023). Replacing conventional iron with cysteine-coated Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles in soilless culture of strawberry. *Scientia Horticulturae* 318:112098. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112098>.

Egboluche NP, Yu H and Wachira J (2022). Alteration of Soil Bacteriome by Prolonged Exposure to Metal Oxide Nanoparticles. *bioRxiv* 2022-05. DOI: <https://doi.org/10.1101/2022.05.16.492223>.

Liu D, Iqbal S, Gui H *et al.* (2023). Nano-iron oxide (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) mitigates the effects of microplastics on a ryegrass soil–microbe–plant system. *ACS Nano* 17(24):24867-24882. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsnano.3c05809>.

Rodríguez-Jurado S, Guevara-González RG, Aguirre-Becerra H *et al.* (2025). Nanoparticles as Potential Eustressors in Plants. *Agronomy* 15:2186. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy15092186>.

Romero F, Hilfiker S, Edlinger A *et al.* (2023). Soil microbial biodiversity promotes crop productivity and agro-ecosystem functioning in experimental microcosms. *Science of The Total Environment* 885:163683. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163683>.

Sun J, Yang W, Li M *et al.* (2025). Metagenomic analysis reveals soil microbiome responses to microplastics and ZnO nanoparticles in an agricultural soil. *Journal of Hazardous Materials* 138164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138164>.

Younes NA, El-Sherbiny M, Alkharpotly AA *et al.* (2024). Rice-husks synthesized-silica nanoparticles modulate silicon content, ionic homeostasis, and antioxidants defense under limited irrigation regime in eggplants. *Plant Stress* 11:100330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100330>.

Manuscrito aceptado