

Sección: Hot Science

Chiquitas pero picosas: las nanopartículas en la biotecnología vegetal

Tiny but powerful: nanoparticles in plant biotechnology

Karla Yunuen Trueba-Sánchez
María Teresa González-Arno*

Facultad de Ciencias Químicas Región Córdoba-Orizaba, Universidad Veracruzana, Veracruz, México.

*Autor para la correspondencia: teregonzalez@uv.mx

RESUMEN

La nanotecnología estudia la manipulación de la materia a escala de 1 a 100 nm y en ésta, los materiales adquieren propiedades únicas muy valiosas. Las nanopartículas (NPs) fueron utilizadas por las antiguas civilizaciones sin que ellas lo supieran, pero hoy en día, pueden ser encontradas en productos cotidianos y sus aplicaciones abarcan diversas áreas del conocimiento como la biotecnología vegetal. Las NPs metálicas pueden actuar como micronutrientes o agentes antimicrobianos en el cultivo *in vitro* y como protectores celulares en técnicas de conservación a largo plazo como la crioconservación.

Palabras clave: Nanotecnología, biotecnología, conservación vegetal.

SUMMARY

Nanotechnology studies the manipulation of matter on a scale of 1 to 100 nm, at which point materials acquire unique and highly valuable properties. Nanoparticles (NPs) were used by ancient civilizations without their knowledge, but today they can be found in everyday products, and their applications span various fields of knowledge, such as plant biotechnology. Metal NPs can act as micronutrients or antimicrobial agents in *in vitro* culture and as cellular protectors in long-term preservation techniques such as cryopreservation.

Keywords: Nanotechnology, biotechnology, plant conservation.

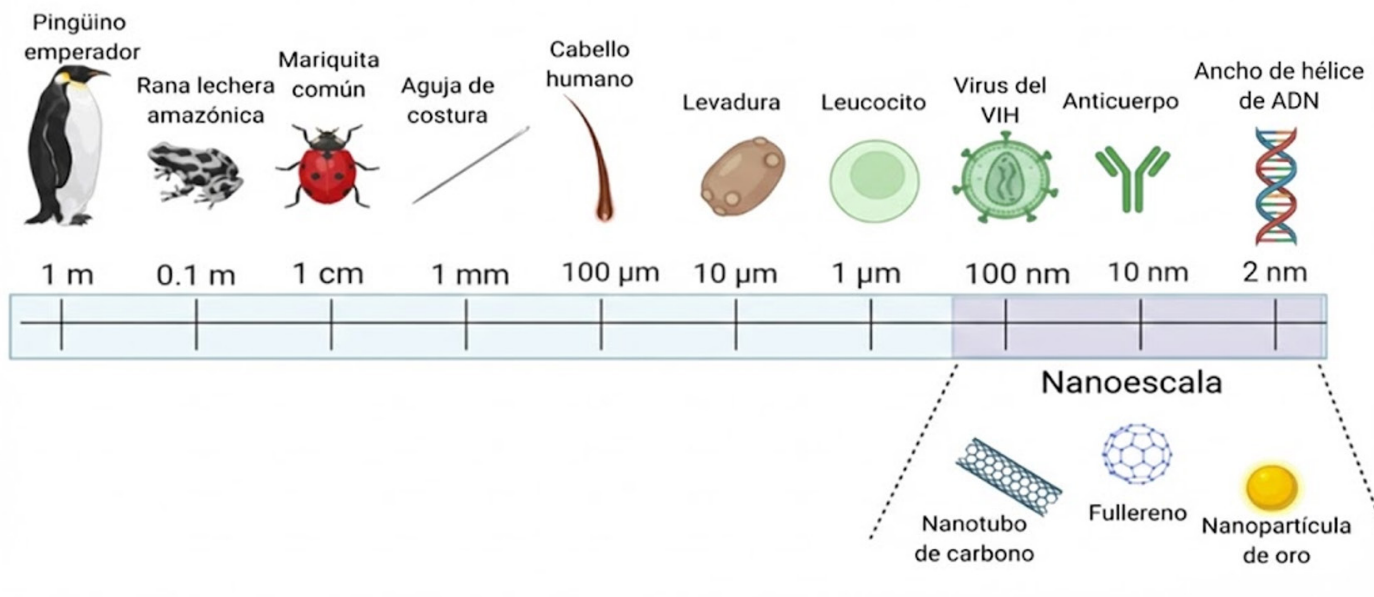


Figura 1. Ilustración comparativa de la escala de metro al nanómetro con diferentes ejemplos. Nanomateriales representados: -nanotubos de carbono, fullereno y nanopartícula de oro-. Ilustración propia creada en BioRender.

¿Sabías que algo mucho más pequeño que el grosor de un cabello puede ayudar a que las plantas crezcan mejor o sobrevivan al frío extremo? Estas diminutas aliadas se llaman nanopartículas, y están revolucionando desde la medicina hasta la biotecnología vegetal.

La nanotecnología, es el campo que estudia y manipula la materia a escala nanométrica (entre 1 y 100 nanómetros), donde un nanómetro equivale a la millonésima parte de un milímetro (Figura 1). Esta ciencia nació oficialmente a partir de 1959 a través de un discurso del famoso físico Richard Feynman. Desde entonces, ha pasado de ser una curiosidad teórica para convertirse en una herramienta clave en múltiples áreas del conocimiento. A esta escala, muchos materiales pueden presentar propiedades distintas a las habituales, como cambios en el color, la conductividad eléctrica o la reactividad química [1].

Las nanopartículas (NPs) son, en esencia, versiones miniatura de los materiales que ya se conocen como el carbono, el oro, el hie-

rró y muchos otros, pero con superpoderes. Su superficie es tan activa que puede atraer o repeler diferentes tipos de iones y moléculas, haciéndolas muy versátiles y determinando si la nanopartícula será útil para curar una enfermedad, limpiar el agua o ayudar a las plantas a crecer [2, 3].

Aunque suene a tecnología futurista, las nanopartículas nos acompañan desde la antigüedad. Las civilizaciones antiguas como la maya o la romana aprovechaban sus efectos sin conocer la ciencia detrás de ellas. El azul maya, por ejemplo, es un pigmento que se mantiene brillante después de siglos gracias a partículas nanométricas de arcilla y pigmentos orgánicos. La famosa copa de Licurgo es una pieza de vidrio romano que cambia de color dependiendo del ángulo de la luz porque contiene nanopartículas de oro y plata (Figura 2). Por consiguiente, los efectos de la materia a escala nanométrica ya se explotaban sin usar microscopios ni laboratorios [1].

El estudio científico de las NPs comen-



Figura 2. Uso de la nanotecnología en la antigüedad. El azul maya (izquierda) mantiene su color y brillo gracias a partículas nanométricas de arcilla y pigmentos orgánicos. La copa de Licurgo (derecha) cambia de color verde a rojo -como se muestra- al contener nanopartículas de oro y plata que interactúan con la luz. Fuente: Mural Maya [bbc.com/mundo/vert-cul-45503886]; Copa de Licurgo [nationalgeographic.com.es/ciencia/copa-licurgo-nanotecnologia-cambia-de-color_19118].

zó en el siglo XIX, cuando Michael Faraday observó que pequeñas partículas de oro suspendidas en líquido podían dispersar la luz de distintas maneras, sentando las bases de la investigación moderna en nanociencia. En el presente, las NPs se clasifican en tres grandes grupos: orgánicas, las basadas en carbono y las inorgánicas [3]. Entre estas últimas, las NPs metálicas (como las de oro, plata, zinc o hierro) son las más estudiadas por su estabilidad y por su capacidad para interactuar con organismos vivos [1, 3].

En los laboratorios de biotecnología vegetal, las NPs metálicas se han convertido en pequeñas aliadas del cultivo *in vitro*, una técnica que permite reproducir aceleradamente plantas en condiciones controladas de temperatura, iluminación y libres de contaminación microbiana, apoyando además la conservación de células y tejidos a corto, mediano y largo plazo. Investigaciones recientes han demostrado que las NPs pueden actuar como suplementos en los medios de cultivo y propiciando un mejor aprovechamiento de elementos esenciales como el zinc o el hierro [4]. También pueden funcionar como agentes antimicrobianos,

evitando contaminaciones durante la manipulación *in vitro* [5] o como protectores celulares, ayudando a reducir el daño oxidativo después de procesos como la crioconservación, que induce la detención total del metabolismo por el efecto de la ultra baja temperatura de almacenamiento, preferentemente la del nitrógeno líquido (-196 °C) [6] (Figura 3).

Entre las NPs más estudiadas en el cultivo de tejidos vegetales (CTV), se encuentran las de plata (Ag), cuya acción antimicrobiana beneficia el desarrollo de los cultivos al garantizar un ambiente libre de gérmenes y contaminantes -lo cual es fundamental y requerido para el éxito del desarrollo de las plantas *in vitro*-, pero ¿cómo lo consiguen? La eficacia de las AgNPs se debe a la liberación de iones de plata (Ag⁺) desde la superficie de estas, los cuales son altamente reactivos con diferentes compuestos celulares. La acción más conocida que provoca la muerte y eliminación de los microorganismos está relacionada con los daños que ocasionan los iones de Ag⁺ a la pared celular de los agentes microbianos. Se producen cambios en la configuración tridimensional de las proteínas, se rompen enlaces de

a) NPs metálicas enriqueciendo el medio de cultivo



b) NPs metálicas incorporadas a la cápsula para crioconservación

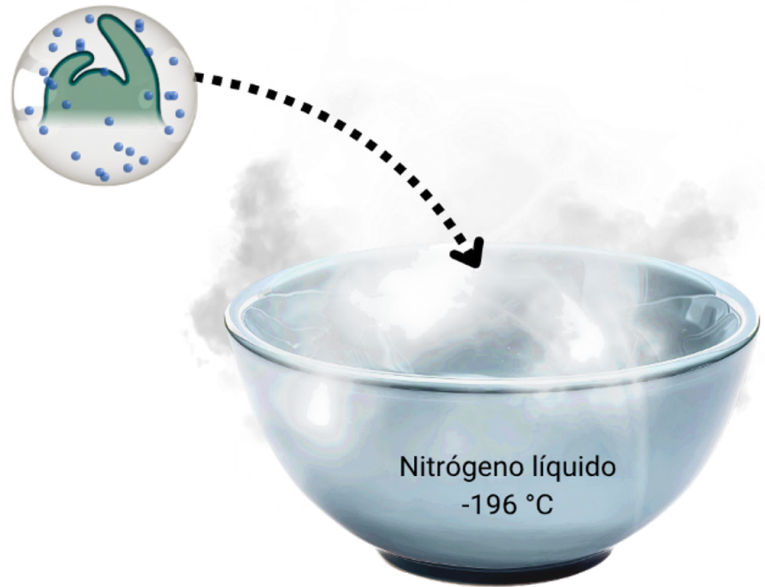


Figura 3. Uso de nanopartículas metálicas en la biotecnología vegetal para el cultivo y la conservación *in vitro* a largo plazo. a) Incorporación de nanopartículas al medio de cultivo como micronutrientes o agentes antimicrobianos. b) Uso de nanopartículas en cápsulas de alginato de calcio para la crioconservación de tejidos vegetales. Ilustración propia creada en BioRender.

azufre y, en consecuencia, se obstruyen sitios de activación enzimática. Para visualizarlo de una manera sencilla, se podría imaginar como una pared de Legos (proteínas y lípidos) la cual está formada por miles de piezas distintas funcionando todas en conjunto, pero al entrar las AgNPs, este orden se rompe, y provoca que las uniones entre las piezas se destruyan y que otras no embonen más entre ellas [6].

Por otro lado, las AgNPs tienen el efecto de bloquear al etileno. En las plantas, el etileno es una hormona natural que funciona como indicador de maduración o senescencia (envejecimiento), la cual suele activarse bajo condiciones de estrés. Para algunas bacterias presentes en el medio de cultivo, el etileno puede ser una fuente de carbono o, en otras palabras, alimento. Al ser bloqueado el etileno, se obtiene un doble beneficio: las bacterias pasan hambre, pues no tienen disponible su comida, lo que ayuda a controlar el desarrollo de la po-

blación microbiana [6].

Aparte de la acción antimicrobiana, existen otros beneficios como los que aportan las NPs de óxido de zinc (ZnO) durante el cultivo *in vitro*. El zinc es un micronutriente esencial para las plantas involucrado en diversos procesos metabólicos. Al incorporar estas NPs al medio de cultivo, se favorece la regeneración de la planta a partir de un explante, que se refiere a un pequeño fragmento o tejido vegetal- como hoja, tallo o raíz- que sirve para iniciar el desarrollo en un ambiente controlado y libre de contaminación dentro de un laboratorio.

En el caso del plátano, el uso de NPs de ZnO durante el cultivo *in vitro* estimuló la producción de embriones somáticos que son estructuras celulares organizadas, capaces de generar plantas completas, con raíces y brotes idénticos a la original. En cambio, en el caso del café, estas mismas NPs favorecieron el crecimiento desorganizado de las células co-

nocido como formación de callos, los cuales se obtuvieron a partir de fragmentos de hojas. En biotecnología, el cultivo de callos es una técnica esencial para regenerar plantas completas y avanzar en los programas de mejoramiento genético [4].

Existe otro tipo de NPs, como las basadas en óxidos de hierro, siendo las de Fe_2O_3 uno de los ejemplos más representativos en investigaciones *in vitro*. Estas nanopartículas han mostrado beneficios significativos en el desarrollo de cultivos como frijoles de soya, pimientos y tomates. El hierro forma parte crucial de la estructura de la clorofila, molécula que otorga el color verde a las plantas y que juega un papel fundamental en la fotosíntesis (mecanismo por el cual se obtiene energía). Adicionar NPs basadas en óxidos de hierro promueve un mejor desarrollo de raíces, aumenta la tasa de germinación de las semillas y eleva el contenido de clorofilas en los cultivos. Por consiguiente, la aplicación de este tipo de NPs ha demostrado su utilidad en la mejora de la nutrición y en el vigor de los tejidos que resultan en la producción de plantas con mayor calidad [4].

El uso de diversas NPs en la práctica del cultivo de tejidos no solo ha contribuido con el desarrollo de las plantas, sino que también está abriendo nuevas alternativas estratégicas para la conservación a largo plazo. En este contexto, se pueden aplicar también para la crioconservación de material biológico mediante el almacenamiento a temperaturas inferiores a $-100\text{ }^\circ\text{C}$. Existen protocolos criogénicos que involucran la encapsulación de los tejidos en geles de alginato de calcio y con este recubrimiento sintético, se logra la protección frente a procesos drásticos como la deshidratación y la congelación, además, posteriormente puede funcionar como una semilla artificial. Recientemente, se ha descubierto que adicionar NPs de oro (Au), Ag^+ y ZnO a las cápsulas de alginato, incrementa la efectividad de los métodos y la sobrevivencia ante el estrés que impone la crioconservación [7].

Bioquímicamente, estas NPs pueden actuar como potentes antioxidantes, lo cual cobra mayor importancia durante la etapa de recuperación de los tejidos crioconservados. El estrés térmico que debe superar el explante, genera una gran cantidad de especies reactivas de oxígeno (ROS), moléculas tóxicas que causan daño oxidativo a las membranas celulares y al ADN. La acción antioxidante de las NPs neutraliza a las ROS, ayudando a la sobrevivencia y a la recuperación del material biológico posterior al estrés experimentado [7].

En conjunto, estos avances apuntan a que la nanotecnología puede ser una herramienta clave para la agricultura sostenible y la conservación de especies. Sin embargo, su aplicación requiere una evaluación cuidadosa ya que factores como la dosis y el tipo de nanopartícula determinan su impacto. Una concentración elevada puede provocar estrés oxidativo, daños en las membranas celulares o incluso inhibir el crecimiento de raíces, fenómeno conocido como fitotoxicidad [4].

Aun así, el uso de NPs en plantas sigue siendo un mundo de exploración constante en el que persisten vacíos significativos sobre el comportamiento a largo plazo en los ecosistemas. Es fundamental entender que cada especie reacciona de manera única; lo que funciona para un cultivo podría ser tóxico para otro, lo que requiere un estudio particular para cada sistema. Pese a estos retos, es innegable que estas diminutas estructuras están abriendo caminos prometedores para un progreso biotecnológico más eficiente, que beneficia tanto a la producción agrícola como a la investigación y conservación vegetal *in vitro*.

Una buena moraleja de las NPs es que el tamaño no lo es todo. Hay poderes que, de ser aparentemente invisibles, se proyectan a la vista con la evidencia de su efecto. En la naturaleza —y en la ciencia— todo vale y lo pequeño no demerita el impacto.

Referencias

- [1] Naito, M., Yokoyama, T., Hosokawa, K., & Nogi, K. (2018). Basic properties and measuring methods of nanoparticles. En T. Yokoyama (Ed.), *Nanoparticle technology handbook* (pp. 3–47). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-01011-X>
- [2] Richa, T., & Shankar, M. K. (2021). History and preparations of nanoparticles. *International Journal of Current Pharmaceutical Review and Research*, 13(4), 10–24. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12664512>
- [3] Joudeh, N., & Linke, D. (2022). Nanoparticle classification, physicochemical properties, characterization, and applications: A comprehensive review for biologists. *Journal of Nanobiotechnology*, 20(1), Article 262. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01477-8>
- [4] Prasad, A., Sidhic, J., Sarbadhikary, P., Narayanankutty, A., George, S., George, B. P., & Abrahamse, H. (2024). Role of metal nanoparticles in organogenesis, secondary metabolite production and genetic transformation of plants under in vitro conditions: A comprehensive review. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 158(2), Article 33. <https://doi.org/10.1007/s11240-024-02833-2>
- [5] Pastelín-Solano, M., Ramírez-Mosqueda, M., Bogdanchikova, N., Castro, C., & Bello-Bello, J. (2020). Las nanopartículas de plata afectan la micropropagación de vainilla (*Vanilla planifolia* Jacks. ex Andrews). *Agrociencia*, 54(1), 1–13.
- [6] Mahajan, S., Kadam, J., Dhawal, P., Barve, S., & Kakodkar, S. (2022). Application of silver nanoparticles in in vitro plant growth and metabolite production: Revisiting its scope and feasibility. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 150(1), 15–39. <https://doi.org/10.1007/s11240-022-02249-w>
- [7] Kulus, D., Tymoszyk, A., Kulpińska, A., Vinhmannova, I., Wojnarowicz, J., & Szalał, U. (2024). Effect of nanoparticles on the ex vitro performance of cryopreservation-derived plant material. *PLOS ONE*, 19(9), e0310424. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0310424>