

Revista Latinoamericana de Difusión Científica



Volumen 6 - Número 11
Julio – Diciembre 2024
Maracaibo – Venezuela

Tendencias en el uso de nanopartículas en la agricultura

DOI: <https://doi.org/10.38186/difcie.611.03>

Saúl Sánchez-Valdés*
José Alberto Rodríguez-González*
Anhely Carolina Sánchez-Martínez**
Karen Bustos*
Marcela Vargas Cruz*
Lourdes Cruz Martínez*
Julieta Torres-González*
Sonia Noemi Ramírez-Barron****

RESUMEN

El objetivo de esta revisión es visualizar las tendencias en el uso de nanopartículas en la agricultura, siguiendo la metodología de revisión de la literatura disponible en bases de datos, como revistas, libros, patentes y otros documentos. Resultados: la integración de nanopartículas dentro de la agro tecnología ha provocado una profunda revolución en múltiples ámbitos de la agricultura. Estas entidades minúsculas han surgido como grandes aliados en el control biológico, gestión eficaz de plagas y enfermedades en los cultivos. Los nano-pesticidas, producto de la innovación nanotecnológica, muestran una entrega mejorada de pesticidas, mecanismos de liberación controlada y una mayor adherencia a las superficies de las plantas, reduciendo así las cantidades de pesticidas y limitando la dispersión ambiental, mitigando así el daño potencial. El despliegue de nano sensores y nano biosensores asume un papel crucial en la gestión pos-cosecha, detectando el deterioro, presencia de patógenos y parámetros de calidad en productos agrícolas. Además, las nanopartículas muestran un prometedor potencial en la degradación de pesticidas presentes en el suelo y agua, empleando técnicas de nano-remediación para descomponer residuos de pesticidas y mitigar su impacto adverso en los ecosistemas y la salud humana.

PALABRAS CLAVE: Nanotecnología, agricultura, nanopartículas, agrotecnología.

*Centro de Investigación en Química Aplicada, Depto. De. Blvd. Enrique Reyna H. 140, San José de Los Cerritos, 25294, Saltillo, Coahuila, México. E-mail: saul.sanchez@ciqa.edu.mx

**Faculty of Biological Sciences, Autónomos University of Nuevo León, Pedro de Alba, Niños Héroes, Ciudad Universitaria, 66455 San Nicolás de los Garza, México.

***Division of Graduate Studies and Research, Technological Institute of Cd. Madero, Col. Los Mangos, C.P. 89440, Cd. Madero, Tamaulipas, México.

****Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, Saltillo 25315, México.

Trends in the Use of Nanoparticles in Agriculture

ABSTRACT

The objective of this review is to visualize the trends in the use of nanoparticles in agriculture, following the methodology of reviewing the literature available in databases, such as magazines, books, patents and other documents. Results: the integration of nanoparticles within agrotechnology has caused a profound revolution in multiple areas of agriculture. These tiny entities have emerged as great allies in biological control, effective management of pests and diseases in crops. Nano-pesticides, a product of nanotechnology innovation, exhibit improved pesticide delivery, controlled release mechanisms, and greater adhesion to plant surfaces, thereby reducing pesticide quantities and limiting environmental dispersion, thereby mitigating potential harm. . The deployment of nano sensors and nano biosensors assumes a crucial role in post-harvest management, detecting deterioration, presence of pathogens and quality parameters in agricultural products. Furthermore, nanoparticles show promising potential in the degradation of pesticides present in soil and water, using nano-remediation techniques to decompose pesticide residues and mitigate their adverse impact on ecosystems and human health.

KEYWORDS: Nanotechnology, agriculture, nanoparticles, agrotechnology.

Introducción

El objetivo de esta revisión es visualizar las tendencias en el uso de nanopartículas en la agricultura. Así, en 2015, muchos países firmaron la "Agenda 2030 pventajas y limitaciones para el Desarrollo Sostenible" de la ONU, que estableció 17 objetivos para lograr un mundo más equitativo. El segundo objetivo fue nombrado "Hambre Cero" e implica el acceso a alimentos para todos en el mundo. El cambio climático ha estado afectando a este objetivo de muchas maneras: reducción de la lluvia en todo el mundo, aumento de plagas, desertificación, entre otros. El control de plagas ha sido abordado desde diferentes ángulos: pesticidas químicos, plantas genéticamente modificadas, control biológico y recientemente el uso de la nanotecnología.

El uso de nanopartículas en la agricultura aporta muchos beneficios a la producción de alimentos. Por ejemplo, el aumento de la tasa de producción, el control de enfermedades y plagas de las plantas, y una mejor salud de las plantas son algunos de los beneficios del uso de nanopartículas. En esta revisión examinaremos detenidamente algunas aplicaciones de nanopartículas en la agricultura.

1. Nanopartículas en el control biológico y nano pesticidas

1.1. Nanopartículas biogénicas de titanio

El uso de *Trichoderma* en la agricultura es bien conocido por su actividad como controlador de Fito patógenos y promotor del crecimiento de las plantas. De hecho, el control biológico ha sido una propuesta revolucionaria para detener el uso de agroquímicos, pero aún existen algunas dudas sobre su implementación. Según Pasquoto-Stigliani et al. (2023), esta alternativa enfrenta obstáculos para alcanzar un éxito total, como la viabilidad de los microorganismos utilizados como agentes de bio-control, el almacenamiento del producto y la interferencia de productos combinados. Por esta razón, nuevas alternativas, como las nanopartículas, están siendo exploradas para el control de patógenos.

El uso de dióxido de titanio en las plantas ha sido útil para aumentar la producción de biomasa y la tasa fotosintética (Satti et al., 2021). Además, la síntesis de nanopartículas de titanio utilizando óxido de titanio IV (Rutilo) como precursor metálico y el filtrado de *Trichoderma harzianum* como agente estabilizante han mostrado una actividad biológica potencial contra Fito patógenos, así como una notable estimulación en el crecimiento de *T. harzianum*, mejorando su eficacia para el control biológico (Pasquoto-Stigliani et al., 2023).

La evaluación de la influencia de la simulación de la pared celular de *Sclerotinia sclerotiorum* en la actividad biológica de las nanopartículas de titanio reveló resultados notables. Específicamente, la aplicación de estas nanopartículas resultó en la inhibición del crecimiento micelial y la formación de nuevos esclerocios. Por el contrario, se documentó una proliferación observable de *T. harzianum* en placas tratadas con las nanopartículas a una concentración de $6.8 \times 10^9 \pm 1.4 \times 10^9$, reconociendo la posible presencia de propágulos residuales. Esto llevó a la colonización de esclerocios iniciales, impidiendo posteriormente el crecimiento micelial de *S. sclerotiorum*. Notablemente, el estudio concluyó que las nanopartículas no indujeron estrés oxidativo en las placas de referencia, según lo determinado por su morfología y las evaluaciones de toxicidad realizadas en líneas celulares animales (Pasquoto-Stigliani et al., 2023).

1.2. Nanopartículas de cobre

Cumplido-Nájera y colaboradores (2019) realizaron la aplicación de nanopartículas de cobre y estimulación de silicato de potasiotolerancia a *Clavibacter michiganensis* en

plantas de tomate, se utilizó la aplicación de nanopartículas de cobre y silicato de potasio. Se ha observado que estimula la actividad de las enzimas SOD, PAL, GPX y APX, así como la concentración de sustancias como glutatión reducido y fenoles totales en las hojas. También se obtuvo una reducción en la pérdida de rendimiento debido a bacterias, especialmente en tratamientos que incluían dosis bajas de CuNP. En general, las aplicaciones de estas nanopartículas en conjunto fueron efectivas reduciendo el daño causado por *C. michiganensis*. Además, se redujo la pérdida de rendimiento debida a infecciones bacterianas.

Las nanopartículas para la protección de plantas pueden reducir la contaminación, los pesticidas y, al mismo tiempo, mejorar la seguridad alimentaria. Adisa y sus colaboradores (2018) realizaron un estudio con plántulas de *Solanum lycopersicum* de 3 semanas de edad que fueron expuestas, por vía radicular o foliar, a nanopartículas de CeO₂ y acetato de cerio a 50 y 250 mg/L, y el suelo fue inoculado con el hongo patógeno *Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici* (1 g/kg). La gravedad de la enfermedad se redujo significativamente con 250 mg/L de nano-CeO₂ y CeAc aplicados al suelo (53 % y 35 %, respectivamente) o a las hojas (57 % y 41 %, respectivamente) en comparación con los controles infestados no tratados. Estos hallazgos sugieren que el nano-CeO₂ tiene el potencial de suprimir eficazmente la marchitez por *Fusarium* y mejorar el contenido de clorofila en las plantas de tomate.

Otros estudios han comparado las láminas nanométricas de Cu₃(PO₄)₂·3H₂O con nanopartículas de CuO comerciales para determinar la influencia del anión coordinante, la morfología de las partículas y el perfil de disolución en la enfermedad inducida por arena. Las láminas Nanométricas de Cu₃(PO₄)₂·3H₂O mostraron una disolución inicial rápida y suprimieron significativamente la enfermedad fúngica, medida por el rendimiento y por una disminución del 58 % en la progresión de la enfermedad. En contraste, las nanopartículas de CuO solo produjeron efectos significativos sobre la enfermedad a 1000 mg/L. El método de aplicación fue un factor importante en el éxito del tratamiento, siendo el método de inmersión más efectivo que la pulverización foliar. Los datos mostraron que los materiales nanométricos a base de Cu pueden ser una estrategia efectiva y sostenible en el manejo de enfermedades en los cultivos, pero las características de las partículas como

la morfología, el entorno de coordinación y el perfil de disolución serán determinantes importantes del éxito (Borgatta et al., 2018).

1.3. Nanopartículas de plata

La aplicación de nanopartículas en la protección de plantas contra patógenos vegetales es un área en crecimiento en el manejo de enfermedades vegetales. En este estudio, se investigó el potencial de las nanopartículas de plata (AgNPs) sintetizadas con extracto acuoso de *Artemisia absinthium* contra varias especies de *Phytophthora* que causan enfermedades importantes en los cultivos. Los experimentos in vitro e in planta revelaron que las AgNPs previnieron la infección por *Phytophthora* y mejoraron la supervivencia de las plantas, sin producir efectos adversos en el crecimiento de las plantas (Guleria et al., 2023).

1.4. Nanopartículas de óxido de magnesio

La marchitez bacteriana es un problema importante en el tomate y otros cultivos. Se ha investigado el efecto de las nanopartículas de óxido de magnesio (MgO NPs) en la resistencia de las plantas de tomate contra *Ralstonia solanacearum* y su actividad antibacteriana. Las raíces de plántulas de tomate fueron inoculadas con *R. solanacearum* y luego tratadas con MgO NPs. Los resultados mostraron que:

- Las plantas tratadas con MgO NP en sus raíces muestran una inhibición muy pequeña de la marchitez bacteriana.
- Cuando las raíces se empapan con una suspensión de MgO NP antes de la inoculación con el patógeno, la incidencia de la enfermedad se reduce significativamente.
- Se observará una rápida generación de especies reactivas de oxígeno, como radicales $O_2^{\cdot-}$, en las raíces de tomate tratadas con MgO NP.
- La expresión de genes relacionados con la resistencia sistémica, como PR1, LoxA, Osm y GluA, fue regulada positivamente tanto en las raíces como en los hipocotilos de las plantas de tomate después del tratamiento de las raíces con MgO NP.

- Los análisis histoquímicos mostraron que la β -1,3-glucanasa y las tilosis se acumularon en el xilema y el apoplasto de los tejidos del píceo del hipocotilo después del tratamiento con MgO NP.

Estos resultados indican que las nanopartículas de MgO inducen resistencia sistémica en las plantas de tomate contra *R. solanacearum* y pueden tener potencial en el control de enfermedades bacterianas en el tomate y otros cultivos (Imada et al., 2016).

La mancha bacteriana causada por *Xanthomonas perforans* es una enfermedad importante de los tomates que resulta en una reducción del rendimiento del 10% al 50%. Aunque los bactericidas a base de cobre (Cu) se han utilizado para el control de la enfermedad, la mayoría de las cepas de *X. perforans* aisladas de tomates en Florida y en otros lugares del mundo son resistentes al cobre. En un estudio, se desarrollaron nanopartículas (NPs) de plata (Ag) dirigidas al ADN y crecidas sobre óxido de grafeno (GO) para combatir la enfermedad. Estos compuestos Ag dsDNA GO disminuyen efectivamente la viabilidad de las células de *X. perforans* en cultivos y plantas a una concentración muy baja. Además, en un experimento de invernadero, las partículas Ag dsDNA GO en plántulas de tomate redujeron significativamente la gravedad de la enfermedad de la mancha bacteriana en comparación con plantas no tratadas, dando resultados similares al tratamiento estándar actual para los cultivadores, sin fitotoxicidad de Ocoy (Guleria et al., 2023).

2. Nanofertilizantes

Los nanofertilizantes son formulaciones de fertilizantes que incorporan nanopartículas, las cuales son partículas extremadamente pequeñas en la escala nanométrica. Estas nanopartículas pueden ser de diferentes tipos, como nanopartículas de elementos nutrientes esenciales, y compuestos orgánicos o inorgánicos.

La aplicación de fertilizantes se utiliza para generar una cantidad adecuada de alimentos para una población que continúa creciendo. Sin embargo, los fertilizantes, especialmente el nitrógeno (N) y el fósforo (P), se utilizan en exceso debido a su baja eficiencia y su disponibilidad en una forma química que no es la más favorable, siendo posteriormente absorbidos por las plantas (Duan et al., 2014). La eficiencia típica de uso

de fertilizantes de nitrógeno (urea) es de alrededor del 30 % al 40 % y la de fósforo de alrededor del 15 % al 20 % en la mayoría de los ambientes agrícolas (Duan et al., 2016).

Un estudio evaluó la productividad de cereales (trigo y mijo perla) y cultivos oleaginosos (mostaza y sésamo) a través de dos prácticas agrícolas: la aplicación de fertilizantes químicos convencionales y la práctica de la agricultura orgánica utilizando nanofertilizantes de nitrógeno y zinc. El objetivo era explorar alternativas que minimizaran el uso excesivo de fertilizantes sin comprometer la calidad y cantidad de los productos. Durante dos temporadas agrícolas, se realizó un extenso ensayo en el que se demostró la eficacia del manejo de nutrientes mediante fertilizantes orgánicos y nanofertilizantes en los cuatro cultivos estudiados. Se observó un aumento promedio del rendimiento del 5.35 % en trigo, 24.24 % en sésamo, 4.2 % en mijo perla y 8.4 % en mostaza cuando se utilizó la práctica de agricultura orgánica con nanofertilizantes en comparación con la aplicación de fertilizantes químicos convencionales. Este aumento en el rendimiento se relacionó con diversos parámetros de desarrollo como tallos en trigo, longitud de la cabeza de la espiga en mijo perla, número de cápsulas por planta en sésamo y número de silicuas por planta en mostaza. Los resultados sugieren que estas prácticas tienen el potencial de aumentar los ingresos agrícolas y mejorar la salud ambiental al reducir la dependencia de los fertilizantes químicos convencionales (Verma et al., 2023).

En una investigación adicional, el rábano cherry se expuso a nanopartículas de hierro, como Fe_3O_4 , $\text{FeO}(\text{OH})$, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, $\beta\text{-Fe}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{-Fe}_3\text{O}_4$, para mitigar la deficiencia de hierro y prevenir trastornos nutricionales. Se observó un aumento del 58 % en el contenido máximo de hierro, siendo más significativo con Fe_3O_4 , con un 49 % con $\text{FeO}(\text{OH})$, 24 % con $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, 13 % con $\beta\text{-Fe}_2\text{O}_3$, y solo un 4 % con $\gamma\text{-Fe}_3\text{O}_4$ a una concentración de tratamiento de 100 mg/kg. La aplicación de Fe_3O_4 también mejoró los niveles de zinc, vitamina C y proteína bruta. Los resultados indican que las nanopartículas de Fe_3O_4 y $\text{FeO}(\text{OH})$ podrían usarse potencialmente como nanofertilizantes para aumentar el valor nutricional del hierro (Shakoor et al., 2022).

Los nanomateriales, en forma de nanofertilizantes, han demostrado mejorar la producción de cultivos al mejorar la fotosíntesis, optimizar el metabolismo del nitrógeno y facilitar la síntesis de carbohidratos y proteínas. Gracias a su mayor área superficial, permiten una absorción más eficiente y una liberación controlada de nutrientes en el sitio

específico, convirtiéndolos en un sistema de entrega inteligente. La liberación gradual y la distribución dirigida de estos nanofertilizantes contribuyen a mejorar la fertilidad del suelo, la nutrición de las plantas y la eficiencia de las mismas (El-Saadony et al., 2021).

Tabla 1. NPs como fertilizantes

NPs	Uso	Cultivo	Duración	Respuestas	Referencia
ZnS (0.5–2 g/l)	Aplicación foliar	Tomate	15d Intervalo (4 veces)	Aumento de peso y calidad de la fruta	(Kanwal et al., 2023)
MnO, ZnO, FeO (20 ppm)	Aplicación foliar	Calabaza	20d	Valor cuantitativo y cualitativo mejorado	(Shebl et al., 2019)
TiO2 (0.25%)	Semillas/Foliar	Espinaca	48 h/35d	Crecimiento mejorado	(Yang et al., 2007)
Cu (150–340 µg/ml)	Aplicación foliar	Tomate	11d	Control de enfermedades	(Giannousi et al., 2013)

3. Nanosensores

Los nanosensores son dispositivos de detección con una dimensión de menos de 100 nm. Son dispositivos increíblemente pequeños que convierten sustancias físicas, químicas o biológicas en señales detectables. Debido a la capacidad de este dispositivo para detectar cambios físicos y químicos (Adam et al., 2022).

La nanotecnología proporciona dispositivos que tienen un papel único en la agricultura, como los nanobiosensores para detectar el contenido de humedad y el estado de los nutrientes en el suelo, y también para el manejo específico del agua y los nutrientes en el sitio. Pueden ayudar en la detección temprana y la toma de decisiones rápida para aumentar los rendimientos de los cultivos mediante el manejo adecuado del agua, la tierra, los fertilizantes y los pesticidas para la agricultura de precisión. En este contexto, también se pueden mencionar los nano-biosensores, que son la próxima generación de biosensores que son más compactos y están vinculados a un elemento sensibilizado para detectar un analito selectivo a una concentración ultra baja a través de un transductor

fisicoquímico que contiene materiales de tamaño nano que actúan como un bioreceptor en un transductor para detectar un solo o múltiples analitos (Usman et al., 2020).

Los nanosensores pueden estar basados en nanopartículas y nanoclústeres debido a las excelentes propiedades ópticas dependientes del tamaño de las nanopartículas, especialmente las nanopartículas de metales nobles, y también pueden detectar bajas concentraciones de sustancias que pueden ser dañinas (Samal et al., 2023). Por ejemplo, un cambio de color notable podría indicar la presencia de una proteasa en una nanopartícula. El tamaño, la forma y la sustancia de una nanopartícula, así como su entorno, influyen en el espectro de un fenómeno llamado "resonancia de plasmones superficiales localizados" (LSPR). Funciona como la sensibilidad excepcional de los sensores LSPR permite la detección de macromoléculas grandes (Adam et al., 2022).

Los nanosensores también funcionan con nanoclústeres, que son nanopartículas más pequeñas con propiedades que abarcan la brecha entre las nanopartículas y los átomos. Por ejemplo, los nanoclústeres de oro están compuestos por unos pocos cientos de átomos de oro y exhiben una excelente estabilidad química, alta actividad catalítica, biocompatibilidad y fuerte luminiscencia. Son más pequeños que 2 nm de tamaño (Banotra et al., 2017). Se ha presentado un sensor electroquímico con un límite de detección de 214 pM para detectar el organismo causal de la mancha bacteriana del *Solanum lycopersicum* que demostró una prueba de flujo lateral donde utilizaron nanopartículas de oro para la detección de virus (PLRV) y patógenos fúngicos que causan enfermedades en el *Solanum tuberosum*, se informó que el biosensor impedimétrico basado en nanopartículas de oro puede ser utilizado para detectar especies virales cítricas, por ejemplo, CTV (virus de la tristeza de los cítricos), y puede lograr la detección en tiempo real a nivel de 0.1-10 µM. Un nanoelectrodo de Au acoplado con nanopartículas de Cu detecta de manera más precisa los niveles de ácido salicílico en semillas oleaginosas infectadas con el patógeno fúngico *Sclerotinia sclerotiorum* (Zain et al., 2023).

El desarrollo de nanosensores es otro avance notable que contribuye al monitoreo, recopilación y gestión de la salud del suelo y los cultivos. Son capaces de detectar cantidades muy pequeñas de contaminantes, plagas, nutrientes e incluso estrés causado por deficiencias de nutrientes, sequías y temperatura o la presencia de patógenos (El-Beyrouthy et al., 2014).

Uno de los dispositivos es el nanotubo de carbono (CNT), que tiene las propiedades características de detección precisa, diagnóstico y administración de medicamentos para el control de plagas y el manejo de la salud animal. Los dispositivos de nanotubos de carbono han demostrado propiedades potenciales como biosensores equivalentes a biomoléculas como el ADN y son útiles para la detección eléctrica en condiciones biológicas extremas y críticas (Pandey et al., 2018).

Ofrecen redes de nanosensores ubicados en campos cultivados, asegurando el monitoreo en tiempo real del crecimiento de los cultivos y proporcionando datos esenciales que conducen a mejores prácticas agronómicas (El-Beyrouthya et al., 2014). Establecieron nanosensores como HeAptDNA-SWCNT para detectar moléculas señalizadoras de estrés de H₂O₂ para monitorear la salud de las plantas tanto bajo condiciones ambientales como relacionadas con patógenos (Zain et al., 2023).

El monitoreo remoto basado en nanosensores es una detección en tiempo real y la gestión precisa de la planta es posible gracias a estos datos, por ejemplo, los NS ópticos basados en FRET se han aplicado para explorar interacciones de aminoácidos, compuestos celulares y características biofísicas; y los NS electroquímicos se han utilizado para identificar las reacciones químicas de oxidación-reducción en las plantas. El uso de varios NS en la detección de plagas y enfermedades en las plantas (Zain et al., 2023). Además, los nanosensores son soluciones potenciales para el manejo de insectos y plagas. Debido a su especificidad y alta sensibilidad, los NS pueden ser utilizados para detectar instantáneamente insectos en el campo de cultivo, desarrollaron sensores de gases (GSs) utilizando sistemas microelectromecánicos (MEMs) para detectar feromonas sexuales de insectos (C₁₇H₃₄O₂) de chinches a una cantidad de 0.005-0.03 µg (Zain et al., 2023).

4. Nanobiosensores Post-Cosecha

Los avances en nanobiosensores incluyen la detección múltiple donde se pueden detectar múltiples analitos en un solo paso, se sabe que fabrican un nanobiosensor que puede detectar y medir concentraciones de diferentes edulcorantes como sacarosa, glucosa, ciclamato y sacarina. Los nanobiosensores en el suministro de alimentos para la detección de organismos genéticamente modificados confirman las diversas aplicaciones

de los nanobiosensores en la industria alimentaria (Samal et al., 2023). En general, se requieren aptámeros con un peso molecular inferior a 25 kDa en biosensores para la detección de patógenos. Una ventaja de usar estos aptámeros en nanobiosensores es su especificidad, ya que pueden unirse específicamente a bacterias, proteínas, virus, moléculas e iones. Hasta ahora, se han desarrollado varios nanobiosensores basados en bacteriófagos para detectar patógenos como *Staphylococcus aureus* y han sido aprobados por la Administración de Alimentos y Medicamentos de EE. UU. de organismos genéticamente modificados, lo que confirma las diversas aplicaciones de los nanobiosensores en la industria alimentaria (Samal et al., 2023). En conclusión, algunas de las complicaciones asociadas con las técnicas convencionales, como el número limitado de muestras manipuladas en el tiempo, la interferencia con varias matrices y el tiempo prolongado para el análisis, pueden resolverse utilizando nanobiosensores. Por lo tanto, los nanobiosensores proporcionan una detección eficiente con mayor precisión, monitoreo continuo con menos tiempo y costo. El uso de prácticas agrícolas basadas en nanotecnología ha dado como resultado un aumento en el rendimiento y (Samal et al., 2023). El uso de nanosensores en el análisis de alimentos permite el uso de una combinación de nanotecnología, biología y química (Zain et al., 2023).

5. Nanopartículas que degradan pesticidas

La agricultura moderna, junto con diversos factores ambientales, genera contaminación. En los últimos años, la contaminación del agua junto con el aumento de la producción y el uso de pesticidas en la agricultura se han convertido en preocupaciones ambientales y de salud importantes (Chatterjee et al., 2023). En su artículo "Remoción efectiva de pesticidas nitrogenados del agua utilizando nanopartículas de magnetita decoradas con calix areno funcionalizado" se discute el uso de nanopartículas de magnetita decoradas con calixareno funcionalizado para la eliminación eficiente de compuestos que contienen nitrógeno del agua. material. Los estudios han demostrado que las nanopartículas de magnetita modificadas con calixareno e iones de agua pueden usarse como nanoadsorbentes efectivos para los agroquímicos metribuzin (MET) y diclorolan (DIC). Las capacidades de adsorción de MET y DIC son de 5.88 y 1.94 mg g⁻¹, respectivamente. El trabajo reportado por Badawy discute la naturaleza de los

experimentos de investigación y cómo se crearon para la detección de nanopartículas de pesticidas. Para verificar el nivel de muestras contaminadas, con partículas de Fe₃O₄ precipitadas funcionalizadas con derivados de siloxano después del secado con quitosano mediante un método de entrecruzamiento. Luego, se sometieron a espectroscopía infrarroja para confirmar las reacciones e interacciones entre las tres capas de quitosano, siloxano y nanopartículas magnéticamente unidas. Finalmente, los resultados muestran que estos métodos son efectivos para eliminar pequeñas cantidades de adsorbente y solvente de manera rápida y fácil con altos rendimientos (Badawy et al., 2018). Aunque el uso de nanomateriales fabricados sigue creciendo, no está claro cómo interactúan estos materiales con los contaminantes ambientales. Mukherjee informó sobre la concentración de plata (Ag), iones y degradación de nanopartículas en el campo (clordano calentado a 2-clorodifenildicloroetileno) en tres fases. + Metabolitos (DDX) producidos por *Eisenia fetida* (lombriz de tierra). Se encontró que las larvas de NP contenían más Ag (194-245%) que los organismos expuestos a 500 mg/kg y 1000 mg/kg de exposición; el tamaño o el recubrimiento de NP no afectaron el contenido (Mukherjee et al., 2017). Concluyó que la reducción en la acumulación de pesticidas no se vio afectada significativamente por el tipo o la concentración de Ag. Las nanopartículas recubiertas con partículas pequeñas redujeron significativamente las concentraciones de clordano en exposiciones de 500 mg/kg; para ambas concentraciones altas, la adición de clordano no afectó el tamaño o el recubrimiento de las nanopartículas.

La anilina es un producto químico utilizado en la preparación de poliuretanos, pesticidas, etc. Debido a su alta toxicidad, se sabe que es incompatible con el agua potable y las aguas residuales. Dado que la anilina es altamente biodegradable, un método de extracción rentable es esencial. Kiani et al. investigaron el efecto del dopado con níquel en la ferrita de espinela y el zinc para mejorar la actividad fotocatalítica de las nanopartículas magnéticas en la degradación de la anilina. Según la Figura 1, se observó que la anilina fue degradada por el catalizador, de modo que en 8 h con la cantidad de 0.06 g de catalizador, se logró una degradación del 90% (Kiani et al., 2023).

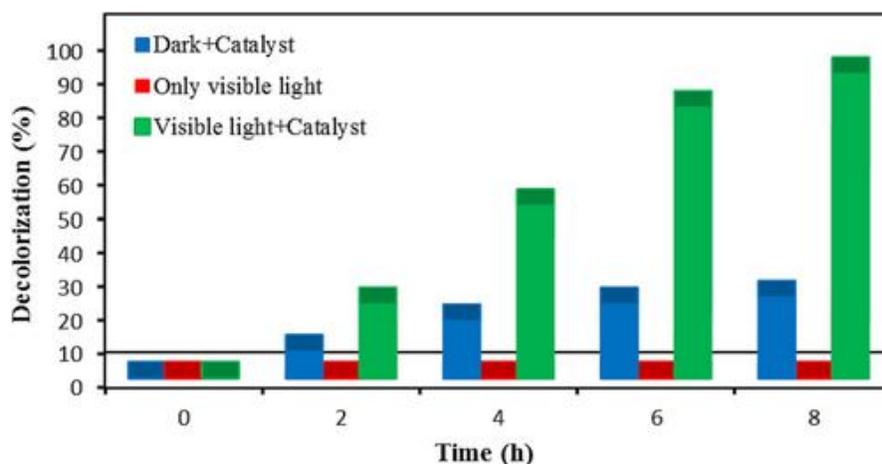


Figura 1. Efecto de la irradiación visible en el rendimiento de degradación (%) de $\text{Ni}_{0.25}\text{Zn}_{0.75}\text{Fe}_2\text{O}_4$ MNPs (10 mg L^{-1}) [24] (Kiani et al., 2023).

La remoción de pesticidas organofosforados del agua utilizando nanopartículas magnéticas Fe_3O_4 /lodo fue investigada por Aydin et al. Los pesticidas organofosforados (POPs) son medicamentos utilizados para combatir patógenos en alimentos, edificios residenciales y comerciales, plantas y céspedes. En el artículo, se menciona que después de usar Fe_3O_4 /lodo tres veces, notaron que la fuerza destructiva y la fuerza de separación magnética no se vieron afectadas. Descubrieron que la película de difusión era el mecanismo de control de la velocidad dominante, y eventualmente observaron que las nanopartículas Fe_3O_4 /lodo rojo eliminaban eficazmente los POPs de muestras de agua reales (Aydin et al., 2016).

6. Retención de agua en el suelo mediante la aplicación de nanopartículas

Los hidrogeles superabsorbentes se han utilizado para abordar la escasez de agua en el mundo de la producción agrícola, un ejemplo de muchos son los hidrogeles superabsorbentes basados en carboximetilcelulosa sintetizados por polimerización de injerto con monómero de ácido acrílico (AA) (Olad et al., 2018). Una limitación para su uso ha sido el alto costo de producción y su baja resistencia mecánica una vez en contacto con el suelo, hablando de hidrogeles naturales.

Cuando los geles se utilizan en el suelo, se ven afectados por la fuerza mecánica ejercida sobre ellos por las partículas del suelo, o si se usan en suelos con un alto contenido de sal, se ha detectado una pobre tolerancia a la sal. Un ejemplo prometedor

desarrollado por Xiong es un gel a base de almidón que consiste en una combinación de almidón de hidroxietilo y alginato de calcio, que se probó en soluciones con diferentes niveles de salinidad, y obtuvo resultados muy prometedores: se mejoró la capacidad de absorción y retención de agua en solución salina, por lo que puede funcionar como un remedio para suelos salinos, haciéndolos aptos para la agricultura (Xiong et al., 2022).

7. Nanopartículas para la mitigación del estrés hídrico

Existen diferentes tipos de estrés biótico y abiótico que pueden sufrir los cultivos, y con el uso actual de nanopartículas (NPs), ciertas NPs se han utilizado para activar mecanismos de las plantas contra un tipo de estrés por déficit de agua.

El silicio como nutriente para los cultivos ha favorecido la resistencia al estrés biótico, por lo tanto, se refleja en un aumento significativo en el rendimiento, se ha demostrado que la aplicación de partículas de nanosílice en el suelo ha aumentado la capacidad del suelo para retener agua, esto se ha comprobado en suelos arenosos (AlSaeedi et al., 2022), suelos francos (Schaller et al., 2020) y normalmente los suelos agrícolas tienden a ser suelos franco-limosos según la clasificación del USDA.

Nassaj y colaboradores (2021) trabajaron con tomate bajo estrés hídrico aplicando un hidrogel con NPs de carbono natural, con tamaños de 1.5 micrones a 200 nanómetros, sus resultados respecto al estrés por déficit de agua mostraron un aumento en el contenido de humedad del suelo, la concentración de fósforo en los brotes aumentó, aunque es cierto que el tiempo de respuesta dependerá en parte de la concentración del nanocompuesto y la severidad del estrés; también indican que en suelos arcillosos una alta concentración de estas NPs puede reducir la porosidad del suelo, lo que afectaría el nivel de aireación de las raíces, y por lo tanto, la planta podría sufrir hipoxia debido al exceso de agua en las raíces.

También se sabe que el óxido de silicio tiene un efecto favorable en el aumento de la tasa fotosintética en las plantas porque el ácido silícico se polimeriza para formar un gel de sílice que actúa como una doble capa de protección del sistema vascular de las plantas, reduciendo la pérdida de agua por transpiración, por lo tanto, las NPs de sílice se utilizan para prevenir el estrés hídrico en los cultivos. En un estudio reportado por Seleiman et al., (2023) el estrés por déficit de agua en el cultivo de papa, la evaluación del peso fresco y

seco de los tubérculos, mejoró y aumentó con la aplicación de ZnO en todos los tratamientos (Seleiman et al., 2023). Mohan y colaboradores (2023) evaluaron el uso de varias NP para aliviar el estrés hídrico en el cultivo de mijo. Las NP estudiadas fueron óxido de silicio (SiO₂), óxido de zinc (ZnO) y óxido de cobre (CuO). Comparando, el silicio fortalece la tolerancia al estrés hídrico al mejorar el crecimiento de las raíces, la conductancia estomática y la absorción de agua, así como al reducir las tasas de transpiración y el estrés oxidativo. Es importante considerar que estas NP son un complemento para el manejo agronómico de los cultivos.

Las plantas expuestas a altas temperaturas generan una sobreproducción de especies reactivas de oxígeno (ROS) que causan peroxidación lipídica, daño al ADN, oxidación de proteínas y apoptosis celular. Sin embargo, las ROS funcionan como moléculas señalizadoras bajo este tipo de estrés, y para regular este mecanismo, las plantas activan la producción de ABA. Iqbal y colaboradores (2022) estudiaron el efecto del óxido nítrico (NO) y del ácido abscísico (ABA) bajo estrés por calor en plantas de trigo. Los resultados obtenidos mostraron que la aplicación conjunta de NO y ABA redujo los impactos del estrés por calor en la fotosíntesis. Aunque también señalaron que la producción de ABA dependía de la presencia de NO. Por lo tanto, la adaptación de las plantas contra el estrés por calor mediante ABA puede mejorarse mediante la adición de NO.

Conclusión

Es evidente que el uso de la nanotecnología ha generado múltiples beneficios para la producción agrícola. Mediante el uso de todos los productos agro-nanotecnológicos, se ha logrado controlar la tasa de aplicación de nutrientes, fungicidas, bactericidas, herbicidas y mejoradores de suelo de manera más concisa. Hace años, había un uso excesivo de estos productos por parte de los agricultores.

El uso controlado de los nanofertilizantes ha permitido aumentar la producción de cultivos porque las plantas asimilan nutrientes fácilmente disponibles. La aplicación de nanoclayos en el suelo ha permitido que los cultivos prosperen donde anteriormente se pensaba que era imposible producir al modificar la estructura del suelo. El uso de nanofungicidas en el acolchado del suelo es preventivo para regular la presencia de

algunos microorganismos que pueden afectar el desarrollo del cultivo. Para la poscosecha, se ha mejorado el empaquetado para garantizar la calidad y el contenido nutricional de los productos agrícolas, prolongando su vida útil.

Es evidente que el campo de la nanotecnología aplicada a la agricultura es muy extenso y, por lo tanto, abre todo un campo de investigación y desafíos, ya que se trata de ser muy precisos con lo que se pretende identificar. Aunque no está claro cuán perjudicial puede ser a lo largo de los años para una planta estar sujeta a toda esta nueva red de tecnología, por lo que debemos ser muy profesionales sin ignorar los efectos negativos del uso de la nanotecnología en el medio ambiente.

Referencias

- Adam, T., & Gopinath, S. C. (2022). Nanosensors: Recent perspectives on attainments and future promise of downstream applications. *Process Biochemistry*, 117, 153-173. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2022.03.024>.
- Adisa, I. O., Reddy Pullagurala, V. L., Rawat, S., Hernandez-Viezcas, J. A., Dimkpa, C. O., Elmer, W. H., ... & Gardea-Torresdey, J. L. (2018). Role of cerium compounds in Fusarium wilt suppression and growth enhancement in tomato (*Solanum lycopersicum*). *Journal of agricultural and food chemistry*, 66(24), 5959-5970. <https://doi.org/10.1021/ACS.JAFC.8B01345>.
- AlSaeedi, A. H. (2022). Enhancement of soil water characteristics curve (SWCC) and water use efficiency of cucumber (*Cucumis sativus* L.) in sandy soils by using silica nanoparticles. *Journal of King Saud University-Science*, 34(4), 101926. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101926>.
- Aydin, S. (2016). Removal of organophosphorus pesticides from aqueous solution by magnetic Fe₃O₄/red mud-nanoparticles. *Water Environment Research*, 88(12), 2275-2284. <https://doi.org/10.2175/106143016X14733681696004>.
- Badawy, M. E., Marei, A. E. S. M., & El-Nouby, M. A. (2018). Preparation and characterization of chitosan-siloxane magnetic nanoparticles for the extraction of pesticides from water and determination by HPLC. *Separation Science Plus*, 1(7), 506-519. <https://doi.org/10.1002/SSCP.201800084>.
- Banotra, M., Kumar, A., Sharma, B.C., Nandan, B., Verma, A., Kumar, R., Gupta, V., Bhagat, S., Prospectus of use of Nanotechnology in Agriculture—A Review, *Int J Curr Microbiol Appl Sci* 6 (2017) 1541–1551. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.612.172>.
- Borgatta, J., Ma, C., Hudson-Smith, N., Elmer, W., Plaza Perez, C. D., De La Torre-Roche, R., ... & Hamers, R. J. (2018). Copper based nanomaterials suppress root fungal disease

in watermelon (*Citrullus lanatus*): role of particle morphology, composition and dissolution behavior. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(11), 14847-14856. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b03379>.

Chatterjee, K., Alka, Kumar, S., Sharma, R. K., & Kumari, P. (2023). Effective Removal of Nitrogenous Pesticides from Water Using Functionalized Calix [4] arene-Decorated Magnetite Nanoparticles. *ChemistrySelect*, 8(3), e202203426. <https://doi.org/10.1002/slct.202203426>.

Cumplido-Nájera, C. F., González-Morales, S., Ortega-Ortíz, H., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A., & Juárez-Maldonado, A. (2019). The application of copper nanoparticles and potassium silicate stimulate the tolerance to *Clavibacter michiganensis* in tomato plants. *Scientia horticulturae*, 245, 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.10.007>.

Duan, Y., Xu, M., Gao, S., Liu, H., Huang, S., & Wang, B. (2016). Long-term incorporation of manure with chemical fertilizers reduced total nitrogen loss in rain-fed cropping systems. *Scientific Reports*, 6(1), 33611. <https://doi.org/10.1038/srep33611>.

Duan, Y., Xu, M., Gao, S., Yang, X., Huang, S., Liu, H., & Wang, B. (2014). Nitrogen use efficiency in a wheat–corn cropping system from 15 years of manure and fertilizer applications. *Field Crops Research*, 157, 47-56. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.12.012>.

El Beyrouthya, M., & El Azzi, D. (2014). Nanotechnologies: novel solutions for sustainable agriculture. *Adv Crop Sci Technol*, 2(03), 8863. <https://doi.org/10.4172/2329-8863.1000e118>.

El-Saadony, M. T., Almoshadak, A. S., Shafi, M. E., Albaqami, N. M., Saad, A. M., El-Tahan, A. M., & Helmy, A. M. (2021). Vital roles of sustainable nano-fertilizers in improving plant quality and quantity-an updated review. *Saudi journal of biological sciences*, 28(12), 7349-7359. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.08.032>.

Giannousi, K., Avramidis, I., & Dendrinou-Samara, C. (2013). Synthesis, characterization and evaluation of copper based nanoparticles as agrochemicals against *Phytophthora infestans*. *RSC advances*, 3(44), 21743-21752. <https://doi.org/10.1039/c3ra42118j>.

Guleria, G., Thakur, S., Shandilya, M., Sharma, S., Thakur, S., & Kalia, S. (2023). Nanotechnology for sustainable agro-food systems: The need and role of nanoparticles in protecting plants and improving crop productivity. *Plant Physiology and Biochemistry*, 194, 533-549. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.12.004>.

Imada, K., Sakai, S., Kajihara, H., Tanaka, S., & Ito, S. (2016). Magnesium oxide nanoparticles induce systemic resistance in tomato against bacterial wilt disease. *Plant Pathology*, 65(4), 551-560. <https://doi.org/10.1111/PPA.12443>.

Iqbal, N., Sehar, Z., Fatma, M., Umar, S., Sofu, A., & Khan, N. A. (2022). Nitric oxide and abscisic acid mediate heat stress tolerance through regulation of osmolytes and antioxidants

to protect photosynthesis and growth in wheat plants. *Antioxidants*, 11(2), 372. <https://doi.org/10.3390/ANTIOX11020372/S1>.

Kanwal, A., Sharma, I., Bala, A., Upadhyay, S.K., & Singh, R. (2023). Agricultural Application of Synthesized ZnS Nanoparticles for the Development of Tomato Crop, *Letters in Applied NanoBioScience*. <https://doi.org/10.33263/LIANBS122.058>.

Kiani, M. T., Ramazani, A., & Taghavi Fardood, S. (2023). Green synthesis and characterization of Ni₀. 25Zn₀. 75Fe₂O₄ magnetic nanoparticles and study of their photocatalytic activity in the degradation of aniline. *Applied Organometallic Chemistry*, 37(4), e7053. <https://doi.org/10.1002/AOC.7053>.

Mohan, N., Ahlawat, J., Sharma, L., Pal, A., Rao, P., Redhu, M., & Yadav, S. (2023). Engineered nanoparticles a novel approach in alleviating abiotic and biotic stress in millets: A complete study. *Plant Stress*, 100223. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100223>.

Mukherjee, A., Hawthorne, J., White, J. C., & Kelsey, J. W. (2017). Nanoparticle silver coexposure reduces the accumulation of weathered persistent pesticides by earthworms. *Environmental toxicology and chemistry*, 36(7), 1864-1871. <https://doi.org/10.1002/ETC.3698>.

Nassaj-Bokharai, S., Motesharezedeh, B., Etesami, H., & Motamedi, E. (2021). Effect of hydrogel composite reinforced with natural char nanoparticles on improvement of soil biological properties and the growth of water deficit-stressed tomato plant. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 223, 112576. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112576>.

Olad, A., Zebhi, H., Salari, D., Mirmohseni, A., & Tabar, A. R. (2018). Slow-release NPK fertilizer encapsulated by carboxymethyl cellulose-based nanocomposite with the function of water retention in soil. *Materials Science and Engineering: C*, 90, 333-340. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.04.083>.

Pandey, G. (2018). Challenges and future prospects of agri-nanotechnology for sustainable agriculture in India. *Environmental Technology & Innovation*, 11, 299-307. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.06.012>.

Pasquoto-Stigliani, T., Guilger-Casagrande, M., Campos, E. V., Germano-Costa, T., Bilesky-José, N., Migliorini, B. B., ... & Lima, R. (2023). Titanium biogenic nanoparticles to help the growth of *Trichoderma harzianum* to be used in biological control. *Journal of Nanobiotechnology*, 21(1), 166. <https://doi.org/10.1186/s12951-023-01918-y>.

Samal, S., Mohanty, R. P., Mohanty, P. S., Giri, M. K., Pati, S., & Das, B. (2023). Implications of biosensors and nanobiosensors for the eco-friendly detection of public health and agro-based insecticides: A comprehensive review. *Heliyon*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15848>.

Satti, S. H., Raja, N. I., Javed, B., Akram, A., Mashwani, Z. U. R., Ahmad, M. S., & Ikram, M. (2021). Titanium dioxide nanoparticles elicited agro-morphological and physicochemical

modifications in wheat plants to control *Bipolaris sorokiniana*. *Plos one*, 16(2), e0246880. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246880>.

Schaller, J., Cramer, A., Carminati, A., & Zarebanadkouki, M. (2020). Biogenic amorphous silica as a driver for plant available water in soils. *Scientific Reports*, 10(1), 2424. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59437-x>.

Seleiman, M. F., Al-Selwey, W. A., Ibrahim, A. A., Shady, M., & Alsadon, A. A. (2023). Foliar applications of ZnO and SiO₂ nanoparticles mitigate water deficit and enhance potato yield and quality traits. *Agronomy*, 13(2), 466. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY13020466>.

Shakoor, N., Adeel, M., Zain, M., Zhang, P., Ahmad, M. A., Farooq, T., & Rui, Y. (2022). Exposure of cherry radish (*Raphanus sativus* L. var. *Radculus Pers*) to iron-based nanoparticles enhances its nutritional quality by triggering the essential elements. *NanoImpact*, 25, 100388. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2022.100388>.

Shebl, A., Hassan, A. A., Salama, D. M., Abd El-Aziz, M. E., & Abd Elwahed, M. S. (2019). Green synthesis of nanofertilizers and their application as a foliar for *Cucurbita pepo* L. *Journal of Nanomaterials*, 2019, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2019/3476347>.

Usman, M., Farooq, M., Wakeel, A., Nawaz, A., Cheema, S. A., ur Rehman, H., ... & Sanaullah, M. (2020). Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges and future opportunities. *Science of the total environment*, 721, 137778. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137778>.

Verma, K. K., Song, X. P., Degu, H. D., Guo, D. J., Joshi, A., Huang, H. R., ... & Li, Y. R. (2023). Recent advances in nitrogen and nano-nitrogen fertilizers for sustainable crop production: a mini-review. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 10(1), 111. <https://doi.org/10.1186/s40538-023-00488-3>.

Xiong, H., Peng, H., Kong, Y., Wang, N., Yang, F., Meni, B. H., & Lei, Z. (2022). High salt tolerant hydrogel prepared of hydroxyethyl starch and its ability to increase soil water holding capacity and decrease water evaporation. *Soil and Tillage Research*, 222, 105427. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2022.105427>.

Yang, F. F., & McPherson, B. (2007). Assessment and management of hearing loss in children with cleft lip and/or palate: a review. *Asian Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 19(2), 77-88. [https://doi.org/10.1016/S0915-6992\(07\)80021-5](https://doi.org/10.1016/S0915-6992(07)80021-5).

Zain, M., Ma, H., Nuruzzaman, M., Chaudhary, S., Nadeem, M., Shakoor, N., ... & Ahmad, T. (2023). Nanotechnology based precision agriculture for alleviating biotic and abiotic stress in plants. *Plant Stress*, 100239. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100239>.

Conflicto de interés

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún conflicto de interés.

Copyright

La *Revista Latinoamericana de Difusión Científica* declara que reconoce los derechos de los autores de los trabajos originales que en ella se publican; dichos trabajos son propiedad intelectual de sus autores. Los autores preservan sus derechos de autoría y comparten sin propósitos comerciales, según la licencia adoptada por la revista.

Licencia Creative Commons

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

