

Implicaciones de los nanomateriales utilizados en la agricultura: una revisión de literatura de los beneficios y riesgos para la sustentabilidad[◇]

Implications of nanomaterials used in agriculture: a literature review of benefits and risks for the sustainability

Hermes Pérez-Hernández,*¹ Fernando López-Valdez,** Antonio Juárez-Maldonado,* Alonso Méndez-López,* Cesar Roberto Sarabia-Castillo,* Selvia García-Mayagoitia,* Andrés Patricio Torres-Gómez,* Jessica Denisse Valle-García,** Andrea Yakelín Pérez-Moreno*

ABSTRACT: The properties of nanomaterials and nanoparticles, such as mechanical, chemical, thermal, optical, electrical, and biological make their application possible in the industry: medicine, cosmetics, automotive, personal hygiene, electronics, agriculture, and environment, among others. For more than two decades, nanotechnology has been considered a breakthrough technology for the agricultural area. Research on these materials has shown the potential of nanometric materials as biostimulants of plants' growth and morphological and biochemical characteristics. In addition, nanoproducts can be developed to control pests, diseases, and weeds, among others, with the combined action of nanomaterials and plant metabolites, providing benefits for agriculture. With the information gathered, it has been shown that the controversial effects of nanotechnology applied to agriculture continue to be investigated. Still, in the coming years, with the emergence of new tools, new methodologies, and multidisciplinary work, future research will show evidence in the trophic chain and possibly palpable effects on the human body.

KEYWORDS: nanotechnology, nanoparticles, agronanotechnology, nanopesticides, nanosensors.

RESUMEN: Las propiedades mecánicas, químicas, térmicas, ópticas, eléctricas y biológicas de los nanomateriales y nanopartículas hacen posible su aplicación en áreas de la industria: medicina, cosmética, automotriz, higiene personal, electrónica, agrícola y ambiental, entre otras. Para el sector agrícola, desde hace más de dos décadas, la nanotecnología ha sido considerada como una tecnología de avanzada, las investigaciones sobre estos materiales han mostrado el potencial de

Recibido: 5 de enero, 2022.

Aceptado: 21 de febrero, 2022.

Publicado: 3 de abril, 2023.

[◇] Agradecemos a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, al Instituto Politécnico Nacional por el financiamiento otorgado, y a Conacyt por las becas y apoyos otorgados.

* Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Botánica, Investigación posdoctoral. Saltillo, Coahuila, México.

** Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada, Laboratorio de Biotecnología Agrícola y Agronanobiotecnología. Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala, México.

• Cinvestav-Saltillo, Programa de Sustentabilidad de los Recursos Naturales y Energía. Coahuila de Zaragoza, México.

** Cinvestav-Zacatenco, Programa de Doctorado Transdisciplinario en Desarrollo Científico y Tecnológico para la Sociedad. Ciudad de México, México.

• Autor de correspondencia: hermesph@hotmail.com



materiales nanométricos como bioestimulantes del crecimiento, de las características morfológicas y bioquímicas de las plantas. Además, se pueden desarrollar nano productos para el control de plagas, enfermedades, arvenses, entre otros, con la acción combinada de los nanomateriales y los metabolitos de las plantas dando beneficios a favor de la agricultura. Con la información recopilada, se ha demostrado que se continúan investigando los efectos controversiales de la nanotecnología aplicada a la agricultura, pero, sin duda, en los próximos años, con la aparición de nuevos instrumentos, nuevas metodologías y el trabajo multidisciplinario, las futuras investigaciones mostrarán evidencia en la cadena trófica y posiblemente los efectos palpables en el cuerpo humano.

PALABRAS CLAVE: nanotecnología, nanopartículas, agronanotecnología, nanopesticidas, nanosensores.

Introducción

Los últimos reportes informan que anualmente se siembran más de 3 mil millones de toneladas de cultivos (Ur Rahim *et al.*, 2021) y se estima que esta producción disminuya para el 2050 como resultado de los conflictos relacionados con el cambio climático (Fenu y Francesca, 2020). Por lo tanto, el tema de la nanotecnología ha despertado el interés en la comunidad científica durante la última década para el área agrícola, puesto que las investigaciones muestran evidencia en la mejora de los parámetros morfológicos y bioquímicos (Kaphle *et al.*, 2018). En la nanobiotecnología, como la han nombrado muchos autores (He *et al.*, 2019; Acharya y Pal, 2020), se sugiere que el potencial de acción y efectividad de los nanomateriales (NM) y nanopartículas (NP) utilizados en la agricultura es el resultado de sus propiedades únicas, como tamaño, forma, alta relación superficie/volumen, propiedades catalíticas, ópticas, magnéticas, biológicas, entre otras (Rawtani *et al.*, 2020). De tal manera, los materiales de tamaño nanométrico (1-100 nm) son considerados agentes potenciales como fertilizantes, a través de una entrega eficiente y controlada (Zhao L. *et al.*, 2020).

En contraste, la producción, desarrollo y comercialización de los NM para aplicación en la agricultura ha generado una discusión mundial, debido a la liberación al ambiente (suelo, agua y aire) y su preocupación por los daños contra-productores que ya han sido reportados (Lombi *et al.*, 2019; Pérez-Hernández *et al.*, 2020 y 2021; OECD, 2022). No obstante, a pesar de las contradicciones observadas en numerosos informes de investigación exhaustiva, científicos y tecnólogos esperan que la nanotecnología aplicada a la agricultura genere una influencia beneficiosa en la alimentación y el ambiente (Kaphle *et al.*, 2018).

Se destacan los efectos beneficiosos de diferentes NM y NP metálicas y no metálicas sobre plantas comestibles y no comestibles (Pérez-Hernández *et al.*, 2020). Por ejemplo, estudios, en su mayoría de laboratorio e invernadero y muy pocos a nivel de campo, han evaluado diferentes materiales nanométricos como nanofertilizantes (Khan *et al.*, 2020), que inducen cambios fisiológicos, bioquímicos y genéticos, observando como resultado, un mayor crecimiento y rendimiento, así como un incremento en la producción de biocompuestos, lo cual permite generar alimentos de mayor calidad (González-García *et al.*, 2021a). También, con la finalidad de mejorar la calidad y reducir pérdidas de productos

por daños de insectos plaga y enfermedades, ya sea durante el manejo de los cultivos, cosecha y postcosecha, se han manipulado NM para producir nanoplaguicidas y nanoformulaciones (Raj *et al.*, 2021). Por otra parte, los NM se han considerado como compuestos o sustancias que inducen o provocan a las plantas a desencadenar cambios en los procesos morfológicos y bioquímicos ante el impacto de estrés biótico y abiótico (Memari-Tabrizi *et al.*, 2021). La salinidad, temperatura, metales pesados, plagas y enfermedades, entre otros, son algunos factores que los investigadores han podido controlar mediante el uso de NP. Por ejemplo, durante la evaluación de NP de ZnO (aplicación foliar) en plantas de okra, regadas con agua de mar, las plantas mostraron un alivio al estrés y, en consecuencia, un aumento de clorofila y mejoramiento de la actividad antioxidante (Alabdallah y Alzahrani, 2020). También, con la aplicación de NP de ZnO en plantas de canola expuestas a NaCl, el efecto de las NP provocó un aumento significativo de pigmentos fotosintéticos comparadas con plantas no tratadas con NP (Farouk y Al-Amri, 2019). Asimismo, se está proponiendo el uso de sensores basados en NM en la agricultura, pues su uso ha sido relevante para la detección de contaminantes en suelo, en aguas agrícolas, y en los alimentos, tanto en el campo como después de la cosecha; en el monitoreo del crecimiento y nutrición de cultivos, en el monitoreo de cambios en los factores abióticos (temperatura, humedad, y salinidad, entre otros), así como para la detección de patógenos que provocan enfermedades a las plantas, principalmente (He *et al.*, 2021; Heikal y Abdel-Aziz, 2021). Por lo anterior, es motivante la fabricación de productos nanométricos, se parte de la idea de que, comparado con los productos químicos convencionales, los nanoproductos en su forma simple tienen la ventaja de mejorar las propiedades fisiológicas y bioquímicas de las plantas, o son utilizados como portadores de componentes activos (productos químicos en dosis bajas) o en forma combinada (nanocompuestos), tienen la ventaja de liberar de forma controlada el compuesto activo. También, estos NM ayudan a mejorar la estructura y función de los fertilizantes y plaguicidas mediante el aumento de solubilidad, resistencia contra la hidrólisis y fotodescomposición, además de ser considerados como una tecnología ecológica y de bajo costo (Hernández-Tenorio y Orozco-Sánchez, 2020).

En consecuencia, el presente trabajo tiene como objetivos principales evidenciar los últimos alcances tecnológicos y beneficios de la nanotecnología hacia el área agrícola y ambiental, tanto para México como para el resto del mundo, así como explorar algunos ejemplos de evaluaciones de los NM y las NP sobre plantas y animales terrestres enfatizando los efectos colaterales e inconvenientes ambientales que estos materiales pueden ocasionar al suelo, las plantas, y los animales, incluidos los humanos.

Nanomateriales de uso potencial en la agricultura

La agricultura sostenible es un componente clave del esfuerzo por satisfacer la creciente demanda de alimentos de una población mundial en rápido cre-

cimiento (Zhao *et al.*, 2020). De esta forma, de la nanotecnología, como tecnología de vanguardia, se espera un efecto beneficioso en la agricultura (manejo y protección de cultivos), alimentación, ambiente y envasado de los productos alimenticios, debido a las propiedades únicas de los NM (Kaphle *et al.*, 2018). El uso de NM se ha extendido, y su aplicación en la agricultura ofrece posibilidades muy variadas, desde la estimulación de respuestas favorables, el control de plagas y enfermedades, hasta el seguimiento de características de interés con el uso de nanosensores. Específicamente, se destaca la estimulación de cultivos agrícolas con el uso de NM, pues de este proceso se puede inducir tolerancia al estrés biótico y abiótico (Juárez-Maldonado, 2021). Por sus características fisicoquímicas únicas, se ha comprobado que los NM inducen cambios fisiológicos, bioquímicos y genéticos que dan como resultado un mayor crecimiento, rendimiento, así como un incremento en la producción de biocompuestos, permitiendo generar alimentos de mayor calidad (González-García *et al.*, 2021a; Tripathi *et al.*, 2017; Khan *et al.*, 2017), no sin antes indicar que, el efecto morfológico y bioquímico en plantas depende de las propiedades fisicoquímicas de los NM, como tamaño, forma, agregación, aglomeración, área superficial, y carga eléctrica; además del método de aplicación (vía foliar, hidroponía, suelo), concentración aplicada y tiempo de exposición (Zhao *et al.*, 2020). Sin embargo, investigaciones sugieren que el efecto de los NM también depende de las condiciones de suelo natural, la textura, el pH, materia orgánica, porosidad, capacidad de intercambio de cationes, elementos presentes, entre otros, que, finalmente, dictan el efecto positivo o negativo en los cultivos. No obstante, diversos estudios sugieren que el empleo de materiales nanométricos debe ser juicioso, aplicándolos a bajas dosis para minimizar los efectos negativos en organismos no objetivo (Pérez-Hernández *et al.*, 2020 y 2021).

En la actualidad, hay una extensa información del impacto de diferentes NP metálicas y no metálicas sobre plantas comestibles y no comestibles (González-García *et al.*, 2021b; Jeevanandam *et al.*, 2018). Por ejemplo, dentro de las NP se reconocen los metálicos, los óxidos metálicos, y los no metálicos como las NP de selenio (Se), silicio (Si) y nanomateriales carbono (también llamados nanotubos de carbono, CNT, por sus siglas en inglés). Se han estudiado las NP metálicas, como oro (Au), hierro (Fe), plata (Ag) y se ha manifestado que estas tienen propiedades químicas, ópticas y eléctricas inusuales en comparación con los materiales micrométricos o de tamaños superiores (Asghari *et al.*, 2016). Cuando se refiere a materiales a nano escala, los NM tienen una dimensión menor de 100 nm, con la posibilidad de manipularse a nivel atómico o molecular (González-García *et al.*, 2021a; Zhao *et al.*, 2020) ya sea en forma de nano polvos o nano cristales (Lira-Saldívar *et al.*, 2018a). En esta línea, el desarrollo de nano productos agrícolas, tales como nanosensores, nanofertilizantes, nanopesticidas y nanoformulaciones de agentes de biocontrol son productos actualmente de gran interés para su desarrollo, estudio y aplicación (Raj *et al.*, 2021; Kaphle *et al.*, 2017). En este sentido, ba

sados en estudios de invernadero y laboratorio y en menor cantidad en experimentos en campo, se ha recomendado una variedad de NM para su uso en la agricultura, con el fin de ayudar a reducir el consumo de agroquímicos mediante el uso de sistemas de suministros inteligentes, minimizar las pérdidas de nutrientes y aumentar el rendimiento a través de una gestión optimizada del agua y los nutrientes, además del monitoreo de los factores ambientales (Raliya *et al.*, 2016).

NM para el crecimiento y desarrollo de los cultivos

En el tomate (*Solanum lycopersicum* Mill.) se ha observado que las NP de Cu aplicadas en el sustrato y vía foliar aumentan parámetros de calidad del fruto y variables como el contenido de clorofila en hojas; además, se menciona que las NP de Ag a dosis bajas pueden promover el crecimiento en plantas de arroz (*Oryza sativa* L.). De igual manera, se reporta que las NP de Zn promueven el incremento de la biomasa total. Las NP de Se y Si a bajas concentraciones promueven el crecimiento y en consecuencia se obtiene una mayor concentración de compuestos fenólicos en cultivos como chile (*Capsicum annum* L.) y avena (*Avena sativa* L.) (Sotoodehnia-Korani *et al.*, 2020; Asgari *et al.*, 2018). Por su parte, con los NM de óxidos metálicos, como TiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , ZnO y SiO_2 , se ha demostrado ampliamente que brindan múltiples beneficios a las plantas a través del suministro de micronutrientes y la estimulación de los mecanismos de defensa, que impactan en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Hussain *et al.*, 2018). Por ejemplo, aplicaciones foliares de NP de óxido de cobalto (C_3O_4) y ZnO en plantas como colza (*Brassica napus* L.) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) aumentaron el crecimiento y peso fresco, además de un incremento en el rendimiento (Jahani *et al.*, 2020; Salama *et al.*, 2019). De forma similar, la aplicación de NP de óxido de hierro (25 mg L^{-1}) en semillas de trigo (*Triticum aestivum* L.) promovió la longitud de los brotes, aumentó el contenido de hierro en el grano, demostrando que el tratamiento de semillas con NP representa un enfoque fácil de usar para la fortificación (Sundaria *et al.*, 2019). Un resumen de ejemplos se observa en la tabla 1.

Los NM basados en carbono (como fullerenos y nanotubos de carbono de pared múltiple y simple (MWCNT y SWCNT, respectivamente, por sus siglas en inglés)) poseen diferentes propiedades, incluyendo conductividad, propiedades mecánicas, estabilidad química y propiedades térmicas que provocan efectos en plantas (Saleh, 2020). La tabla 1 muestra cómo los SWCNT promovieron la producción de biomasa y un mayor crecimiento en arroz (*Oryza sativa* L.) (Zhang *et al.*, 2017); a su vez, los MWCNT promovieron el crecimiento, mayor acumulación de biomasa y un mayor rendimiento en trigo (*Triticum aestivum* L.) (Joshi *et al.*, 2018). Además, los fullerenos demostraron tener un efecto positivo en el crecimiento de plantas y compuestos antioxidantes (Shafiq *et al.*, 2019). Sin embargo, el uso de NM a dosis altas puede causar toxicidades y alteraciones en los componentes fisiológicos y genéticos de las plantas (Rico *et al.*, 2015; Tripathi *et al.*, 2015).

Tabla 1. Efecto de los NM sobre el crecimiento y productividad de cultivos hortofrutícolas.

NM	Tipo	Tamaño (nm)	Especie de planta	Vía de aplicación	Concentración	Efecto	Referencia
Nanopartículas metálicas	Cobre (Cu)	50 nm	<i>Solanum lycopersicum</i> L.	Foliar	250 mg L ⁻¹	Mejoraron la calidad de los frutos y la acumulación de compuestos antioxidantes, como vitamina C, licopeno, GSH, fenoles totales y flavonoides.	Pérez-Labrada et al. (2019)
	Cobre (Cu)	42 nm	<i>Solanum lycopersicum</i> L.	Sustrato	10 y 20 mg L ⁻¹	Aumentó el contenido de clorofila en hoja, y en frutos mejoraron los parámetros de calidad nutracéutica y comercial.	Hernández-Hernández et al. (2019)
	Plata (Ag ⁺)	25-50 nm	<i>Oryza sativa</i> L.	In vitro	5-20 µg mL ⁻¹	Mejóro los parámetros de crecimiento de las plantas.	Ibrahim et al. (2019)
	Plata (Ag ⁺)	18 nm	<i>Oryza sativa</i> L.	In vitro	10, 20 y 40 mg L ⁻¹	Mejóro los parámetros de crecimiento, aumentó el contenido de clorofilas e incrementó la actividad antioxidante.	Gupta et al. (2018)
	Zinc (Zn)	20 nm	<i>Triticum aestivum</i> L.	Sustrato	10, 20, 50, 100, 200 y 1000 mg kg ⁻¹	Mejóro el crecimiento y la acumulación de biomasa de las plantas con las dosis más bajas, aumentó el contenido de Zn en los granos de trigo.	Du et al. (2019)

Continúa ▼

Tabla 1. Efecto de los NM sobre el crecimiento y productividad de cultivos hortofrutícolas (continuación).

NM	Tipo	Tamaño (nm)	Especie de planta	Vía de aplicación	Concentración	Efecto	Referencia
	Selenio (Se)	45 nm	<i>Capsicum annuum</i> L.	<i>In vitro</i>	0.5, 1, 10 y 30 mg L ⁻¹	Mejoró el crecimiento, aumentó la actividad de la enzima PAL y las concentraciones de fenoles.	Sotoodehnia-Korani <i>et al.</i> (2020)
	Silicio (Si)	20-30 nm	<i>Avena sativa</i> L.	Hidroponía	5 y 10 mM	Mejoró la expresión de la enzima PAL y la lignificación en las hojas, las raíces y el crecimiento de plantas.	Asgari <i>et al.</i> (2018)
	Oro (Au)	10 nm	<i>Cucumis sativus</i> L., <i>Lactuca sativa</i> L.	Hidroponía	62, 100 y 116 mg L ⁻¹	Mejoró el índice de germinación.	Feichtmeier <i>et al.</i> (2015)
	Hierro (Fe)	9-30 nm	<i>Citrullus lanatus</i> L.	Priming semilla	20, 40, 80 y 160 mg L ⁻¹	Mejoró el crecimiento, pigmentos fotosintéticos, potencial antioxidante, metabolitos y perfiles hormonales.	Kasote <i>et al.</i> (2019)
Óxidos Metálicos	Óxido de cobalto (CO ₃ O ₂)	50 nm	<i>Brassica napus</i> L.	Foliar	50, 100 mg L ⁻¹	Mejoró el crecimiento y la actividad fotosintética.	Jahani <i>et al.</i> (2020)
	Óxido de zinc (ZnO)	8 nm	<i>Phaseolus vulgaris</i> L.	Foliar	30 mg L ⁻¹	Aumentó el peso seco de las plantas, contenido de aminoácidos y el rendimiento.	Salama <i>et al.</i> (2019)

Continúa ▼

Tabla 1. Efecto de los NM sobre el crecimiento y productividad de cultivos hortofrutícolas (continuación).

NM	Tipo	Tamaño (nm)	Especie de planta	Vía de aplicación	Concentración	Efecto	Referencia
	Óxido de zinc (ZnO)	34 nm	<i>Triticum aestivum</i> L.	Priming semilla	25, 50, 75, 100 mg L ⁻¹	Mejóro el crecimiento, la actividad fotosintética y la biomasa de la planta.	Munir et al. (2018)
	Óxido de cerio (CeO ₂)	1.8 nm	<i>Gossypium hirsutum</i> L.	Priming semilla	500 mg L ⁻¹	Aumentó la longitud de la raíz de la plántula, el peso fresco, modificó la estructura anatómica de la raíz y aumentó la vitalidad de la raíz.	An et al. (2020)
	Óxido de hierro (Fe ₃ O ₄)	80 nm	<i>Triticum aestivum</i> L.	Priming semilla	25 a 600 mg L ⁻¹	Aumentó el porcentaje de germinación, la longitud de los brotes, y el contenido de hierro del grano.	Sundaria et al. (2019)
	Dióxido de titanio (TiO ₂)	45 nm	<i>Zea mays</i> L.	<i>Zea mays</i> L.	60 mg L ⁻¹	Aumentó el porcentaje de germinación, el vigor de la plántula mejoró la biomasa fresca y seca de plántulas, la concentración de iones de potasio (K ⁺), Mejoró el contenido de fenoles, prolina, SOD, CAT y PAL.	Shah et al. (2021)
	Óxido de silicio (SiO ₂)	20-30 nm	<i>Trigonella foenum-graecum</i> L.	Hidroponía	0-2.5 mM	Aumentó la biomasa radicular y la biomasa aérea de las plantas.	Nazaralian et al. (2017)

Continúa ▼

Tabla 1. Efecto de los NM sobre el crecimiento y productividad de cultivos hortofrutícolas (continuación).

NM	Tamaño (nm)	Especie de planta	Vía de aplicación	Concentración	Efecto	Referencia
	10 nm	<i>Lactuca sativa</i> L.	Hidroponía	75-600 mg kg ⁻¹	Aumentó la biomasa, el crecimiento, y mejoró la absorción de macronutrientes.	Hayes et al. (2020)
Nanotubos de carbono	20-40 nm	<i>Oryza sativa</i> L.	<i>In vitro</i>	5 y 20 mg L ⁻¹	Aumentó la biomasa, el crecimiento y el contenido ABA y GA.	Zhang et al. (2017)
	13-14 nm	<i>Triticum aestivum</i> L.	Priming semilla	0, 70, 80 y 90 µg de MWCNT por mL	Aumentó la biomasa, el crecimiento de raíces y brotes, y el rendimiento.	Joshi et al. (2018)
Fullerenos	NE	<i>Triticum aestivum</i> L.	Priming semilla	10, 40, 80, y 120 nM	Mejoró el crecimiento temprano de las plántulas e incrementó la clorofila, aminoácidos libres, ácido ascórbico y azúcares solubles.	Shafiq et al. (2018)
	50-70 nm	<i>Beta vulgaris</i> L.	Foliar	700 µmol L ⁻¹ y 70 µmol L ⁻¹ .	Aumento la actividad de enzimas antioxidantes (CAT, APX y GPX)	Borišev et al. (2016)

Nota: NE = No especificado, GSH = Glutatión, PAL = Fenilalanina amonio liasa, SOD = Superóxido dismutasa, CAT = Catalasa, ABA = ácido abscísico, GA = Ácido giberélico, APX = ascorbato peroxidasa, GPX = Glutatión peroxidasa.

Fuente: Elaboración de los autores.

NM para el control de arvenses, plagas y enfermedades

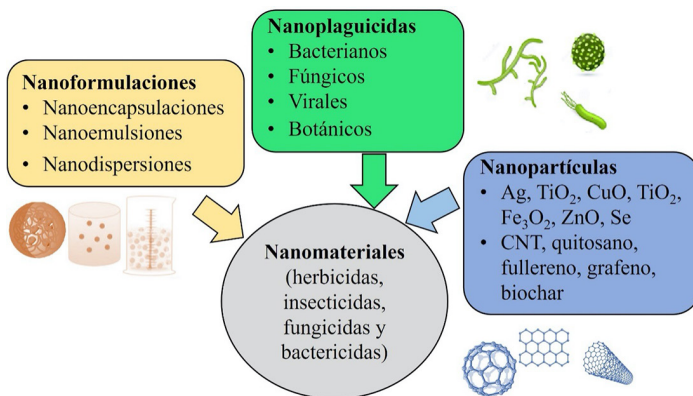
Las plagas agrícolas amenazan la seguridad alimentaria con pérdidas que pueden ir desde el 26 al 80%, mientras que los desafíos del planeta en general son aumentar la producción del alimento en un 4% para satisfacer la demanda de la población. En cuanto a la disminución de la producción por insectos plaga, existen casos sorprendentes que son dignos de observación detenida y solución inmediata. Por ejemplo, en China, la especie *Spodoptera litura* o gusano de tabaco consume más de 112 especies de plantas, generando pérdidas del 10 al 30%. En el caso de la plaga del algodón (*Helicoverpa armigera*) genera 5,000 millones de dólares en pérdidas al atacar a 200 especies de plantas correspondiente a 40 familias. *Myzus persicae* o pulgón verde de melocotonero se alimenta de 40 familias de plantas. Ante ello, investigadores afirman que la nanotecnología tiene el potencial para desarrollar formulaciones con NM y liberar de forma controlada el compuesto activo, estos NM ayudan a mejorar la estructura y función de los plaguicidas (Hernández-Tenorio y Orozco-Sánchez, 2020).

Es bien sabido que las arvenses son fuentes principales para la propagación de plagas, vectores de virus y enfermedades, por lo cual, los nanoherbicidas están siendo utilizados para atacar arvenses y banco de semillas del suelo (Lira-Saldívar *et al.*, 2018b). En el caso de los nanoplaguicidas (insecticidas, fungicidas y bactericidas) han sido evaluados y aplicados para destruir totalmente las plagas o hacer resistentes a las plantas. Además, mediante la síntesis verde o ecológica se han generado los bioplaguicidas bacterianos, de los cuales se obtienen las NP a partir de metabolitos secundarios obtenidos de plantas con actividad biocida, que atacan el sistema digestivo de la plaga. Las NP pueden estar transportadas en nanoemulsiones, nanoencapsulaciones o nanodispersiones (Hernández-Tenorio y Orozco-Sánchez, 2020; Ayala *et al.*, 2020). La nanoemulsión es la dispersión de dos líquidos inmiscibles multi y bifásicos, dinámica de gotas (efecto cizalla), integrado por un surfactante apropiado, con un tamaño que va de 10 a 100 nm. La nanoencapsulación es el empaquetamiento de sustancias activas dentro de otro material, donde la NP se encuentra en un tamaño de 1-100 nm en al menos una dimensión, pueden ser NP de lípidos sólidos, bases poliméricas, hidróxidos dobles laminar (LDH, siglas en inglés) y aceites nano encapsulados. Las nanodispersiones consisten en la dispersión de nanocristales en medios líquidos, suelen ser 100% el compuesto activo en forma de partículas cristalinas o amorfas, con el objetivo de maximizar el área superficial (Hernández-Tenorio y Orozco-Sánchez, 2020) (figura 1).

Los pesticidas en nanoportadores son comercializados y están aprobados por la Agencia de protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés). Entre los más destacados se encuentra el Poridon, aprobado desde 1985, Command, un herbicida aprobado desde 1995, mientras que, el Fenuvstar es un insecticida, y RightLine consiste en un fungicida, mismos que fueron aprobados en 2018. También se encuentran aprobados los lipo-

somas de 35 a 1000 nm, micelas de 20 a 80 nm, albúmina de 130 nm, y en desarrollo se destacan las NP de sílice, NP metálicas, CNT, polímeros naturales (quitosano), dendrímeros, bacteriófagos, entre otros (Charoui *et al.*, 2020).

FIGURA 1. Distribución de los NM utilizados en la agricultura como pesticidas, nanoformulaciones y las NP más utilizadas.



Fuente: Hernández-Tenorio y Orozco-Sánchez (2020).

Las NP pueden atravesar tejidos vivos de las plantas, en el suelo sufren una serie de bio-geo-transformaciones que determinan su biodisponibilidad y toxicidad, se pueden translocar a la parte aérea de la planta después de interactuar con las raíces y acumularse en las células o en los organelos. En la raíz, ocurre la bioacumulación y una serie de biotransformaciones las cuales dependen del tamaño de la NP para después entrar a través de la pared celular o estoma de la planta, esto determina el proceso de transporte. Al mismo tiempo, las propiedades como el área superficial, la morfología y la carga superficial de las NP, también determinan las rutas e interacciones en la planta, la carga negativa de la pared celular atrae la carga positiva de las NP, las NP de 3 a 5 nm pueden atravesar la pared de las raíces por presión osmótica, fuerzas capilares o a través de células epidérmicas; las NPs < 5 nm pueden entrar por las hojas a través de estomas o cutículas de las hojas; > 10 nm entran a través del estoma; entre 10 y 50 nm toman una ruta simplástica; de 50 a 200 nm toman una ruta apoplástica (Ali *et al.*, 2021). En suelo, la interacción que se da entre las NP y la matriz del suelo ocurre en las fases de líquido y sólido de los componentes del suelo, los poros existentes en el suelo pueden hacer la función de sitios de adsorción. Además de la biotransformación de las NP, los micro y macrorrganismos del suelo intervienen en la biotransformación, transporte y descarga de NP (Saleem y Zaidi, 2020).

Hay diversas NP de óxidos metálicos que han sido utilizadas en muchos campos como la medicina, agricultura, etc., pero es poco común demostrar

cómo impactan e interaccionan con diversos factores del suelo, humanos o animales, sobre todo en la cadena trófica. La manufactura de los NM a gran escala necesita ser estudiada y esclarecer la disposición final de estos materiales, entre las NP más utilizadas están las de ZnO, Ag, TiO₂, Fe₂O₃, CuO (Zhu *et al.*, 2019). Estas NP son utilizadas por sus propiedades antimicrobianas. En efecto, el Cu posee propiedad antibacterial y antifúngica debido a la capacidad para aceptar y donar electrones, nivel alto de oxidación catalítica y una reducción potencial alta. Las NP de Ag dañan la pared celular en tamaños de 10 a 20 nm, así como algunos elementos del citoplasma. En otros casos, los CNT han sido probados y aplicados como portadores de agroquímicos y plaguicidas, estos NM son considerados eficientes para el depósito controlado de ingredientes activos (Lira-Saldívar *et al.*, 2018b).

Las NP metálicas son consideradas activas ya que por sí mismas pueden causar un efecto biológico actuando como estimulante, antipatógeno o ambos, una de las NP principales a considerar son las NP de ZnO al estimarse que el 30% de los suelos son deficientes en zinc. También son utilizadas como compuestos con titanato de plata o en conjunto con TiO₂ para fungir como plaguicida (Do Espirito Santo Pereira *et al.*, 2021; Kőrösi *et al.*, 2020). Las NP de ZnO promueven el crecimiento de las plantas, la elongación de raíz, y a tal grado son consideradas promotoras del crecimiento, así como utilizadas como pesticidas, herbicidas o plaguicidas por su actividad antimicrobiana (Surendranath y Mohanan, 2021). Las NP de Ag son aproximadamente el 50% de los NM consumidos en distintos nano productos, asimismo, estas NP tienen diversas aplicaciones antimicrobianas, eléctricas y ópticas, en el suelo son liberadas a partir de distintos procesos, desde su manufactura hasta el uso propio como parte de nanofertilizantes. Hasta donde se sabe, estas NP sufren transformaciones dependiendo de las propiedades fisicoquímicas del suelo (Temizel-Sekeryan y Hicks, 2020). Las NP de Ag tienen propiedades antifúngicas contra la *Cladosporium fulvum*, causante de la enfermedad cladosporiosis en plantas de tomate, por ello, las NP de Ag son utilizadas como antifúngico (el cual dirige su acción al DNA del organismo objetivo) cuando están soportadas en óxido de grafeno, así pues, cuando se encuentran en nanopolímeros, nanoconchas o en combinación con otras NP, son utilizadas como herbicidas, pesticidas y nanoportadores (Chaudhry *et al.*, 2018). Por ejemplo, algunos estudios revelaron que las NP de Ag muestran alteraciones morfológicas en bacterias como *Bacillus cereus* y *Pseudomonas stutzeri*, sin embargo, el óxido de esta NP no mostró toxicidad significativa. De hecho, algunos informes han destacado que, las NP de Ag son significativamente influenciadas por factores como la funcionalización, concentración, tiempo de exposición y la textura del suelo. Adicionalmente, también ha sido reportado que las NP de Ag reducen las actividades enzimáticas, mientras que el uso de NP de ZnO incrementa significativamente la abundancia de *B. cereus* y *P. stutzeri* (Amrane *et al.*, 2020). La luz es otro factor importante cuando se aplican NP de TiO₂, el efecto de la NP potencia-

liza su acción antibacterial a una mayor exposición de luz, en consecuencia, se ha observado una inhibición en el crecimiento de bacterias como *E. coli* y *B. subtilis* (Hou *et al.*, 2019).

Ejemplos de la aplicación de NM

Existen hongos que atacan cultivos de trigo (*Triticum* spp.), produciendo infecciones en la corona y raíz, particularmente por *Fusarium* spp. Estos hongos inhiben la síntesis de proteínas de las células eucariotas. No obstante, el uso de NP de Se (utilizando microorganismos como nanofábricas) con un promedio de 46 nm de tamaño reveló que se suprimió de un 88 a un 92% el crecimiento de los hongos a una dosis de 40 mg mL⁻¹ en condiciones de invernadero. Asimismo, mejoró la tolerancia a la sequía y al estrés por calor (El-Saadony *et al.*, 2021).

Otros estudios demostraron que el nanobiochar (NB) es utilizado para el manejo de enfermedades, su efectividad se atribuye a la alta área superficial, la cual presenta un gran número de grupos funcionales o sitios activos. También, el NB combinado con otras NP ayuda a mejorar la biodisponibilidad de pesticidas (Chausali *et al.*, 2021).

Las NP de quitosano de tamaño entre 100-300 nm son utilizadas contra la enfermedad Anna o podredumbre azul causada por *Penicillium expansum* (afecta a las manzanas). Estas NP en conjunto con NP de agentes microbianos han dado excelentes resultados, debido a que el quitosano es un 'elicitor' abiótico potente de resistencia de plantas a diferentes ataques de patógenos (Abdel-Rahman *et al.*, 2021).

Para el combate de patógenos durante la etapa de postcosecha en mango, causantes de enfermedades por *Colletotrichum gloeosporides*, *Cladosporium oxysporum* y *Penicillium steckii*, se han utilizado compuestos de quitosano con TiO₂ y CNT para inhibir el crecimiento fúngico (Xing *et al.*, 2021).

NM para reducir factores de estrés en los cultivos

El estrés vegetal se presenta cuando una planta se desarrolla en condiciones no ideales, provocando que las plantas presenten un crecimiento deficiente, se reduzca el rendimiento o incluso se induzca la muerte de las plantas si el estrés supera los límites de tolerancia. Se reconocen dos tipos de estrés, el estrés abiótico, aquel causado por factores no vivos, y el estrés biótico, causado por organismos vivos (Mosa *et al.*, 2017; Verma *et al.*, 2013). Recientemente, para dar solución o evitar daños causados por estos factores, la aplicación de la nanotecnología en la agricultura ha recibido gran atención debido a que el uso de NM podría emplearse en la adsorción de compuestos contaminantes, disminución de los impactos por el estrés por sequía y en la eliminación de especies reactivas de oxígeno (ROS) debido a las diferentes interacciones y efectos ejercidos cuando logran penetrar las paredes celulares y desencadenar cambios en los procesos fisiológicos y bioquímicos en las plantas (Memari-Tabrizi *et al.*, 2021; Adrees *et al.*, 2020).

Ante factores abióticos

La salinidad es un factor estresor relacionado con el exceso de especies iónicas. La presencia de sales en el suelo puede producir perturbaciones a nivel celular afectando la nutrición vegetal, la síntesis de pigmentos fotosintéticos o la reducción de la actividad antioxidante, teniendo como consecuencia alteraciones en el crecimiento de las plantas y disminución en el rendimiento de los cultivos (Pérez-Labrada *et al.*, 2019). Por lo anterior, Alabdallah y Alzahrani (2020) encontraron que la aplicación de NP de ZnO a una concentración de 10 mg L^{-1} de manera foliar a plantas de *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench, que fueron regadas con agua de mar a diferentes concentraciones (0, 10, 25, 50, 75 y 100 %), aliviaron el estrés ocasionado por el alto contenido de sal; de tal manera, la aplicación de las NP de ZnO aumentaba el contenido de clorofila a y b, y carotenoides en las hojas de la planta, además de mejorar la actividad antioxidante, y, en consecuencia, un aumento en la producción de la actividad SOD y CAT. De igual manera, Farouk y Al-Amri (2019) encontraron que la aplicación foliar de NP de ZnO a 10 mg L^{-1} aumentó la concentración de pigmentos fotosintéticos en plantas de *Brassica napus* L. cv. Pactol expuestas a $6,000 \text{ mg L}^{-1}$ de NaCl en comparación con las plantas no tratadas con NP. Además, el porcentaje de N, P y K aumentó considerablemente en las plantas que fueron tratadas con NP en relación con las no tratadas.

Alsaeedi *et al.* (2018) reportaron que las NP de SiO_2 a una dosis de 200 ppm aumentaron los parámetros de germinación y crecimiento vegetativo en plantas de *Cucumis sativus* L., expuestas a una concentración de $5,000 \text{ mg L}^{-1}$ de Na^+ . En otro caso, el pretratamiento de semillas de *Pennisetum glaucum* L. con NP de Ag a concentraciones de 0, 10, 20 y 30 mM, expuestas a dosis de 0 a 150 mM de NaCl, aumentó la altura de planta, el contenido de agua y la producción de masa fresca y seca, También promovió la actividad antioxidante, reduciendo así, el daño oxidativo (Khan *et al.*, 2020).

El estrés por sequía afecta drásticamente el desarrollo de plantas y está asociado principalmente con altas temperaturas, dado que hay mayor pérdida de agua por evapotranspiración. Esto trae como consecuencia la disminución del crecimiento de la planta lo que, a su vez, se relaciona con la reducción del área foliar, disminución del potencial hídrico, reducción en la absorción de nutrientes y una reducción del metabolismo vegetal, impidiendo la síntesis de enzimas esenciales para las plantas, generado a través de un estrés oxidativo. En este sentido, diversas investigaciones proponen el uso de NM como enmiendas en los suelos, como medida para mitigar el estrés por sequía. Por ejemplo, Dimkpa *et al.* (2019) evaluaron concentraciones de 1, 3 y 5 mg L^{-1} de NP de ZnO como enmienda en el suelo y estudiaron el comportamiento del cultivo de *Glycine max* L. en condiciones de sequía, obteniendo como resultados la reducción en el retraso de germinación de semillas, un aumento en la absorción N y K, un aumento en el rendimiento del grano, en comparación con los tratamientos no tratados con NP. También, se ha estudiado la aspersión foliar de NM. Zahedi *et al.* (2020), quienes emplearon NP de SiO_2 , NP de

Se y NP de Se soportadas en NP de SiO_2 (Se/SiO_2), demostraron que los tres tipos de NP mejoraron el crecimiento y rendimiento en el cultivo de fresa. No obstante, las NP de Se/SiO_2 presentaron mejores resultados, puesto que mejoraron la concentración de pigmentos fotosintéticos, la eficiencia del uso del agua y un aumento en la cantidad de agua por planta. Además, se detectó un aumento en la actividad antioxidante, lo cual se relacionó con una mayor tolerancia a la sequía; en cuanto al fruto, estos presentaron mejor calidad pues contenían mayor proporción de compuestos fenólicos, vitamina C, antocianina, entre otros.

Otro de los factores abióticos que afectan el desarrollo vegetal y reproductivo de los cultivos es la presencia de metales pesados, los cuales son depositados y acumulados a lo largo del tiempo en el suelo. No obstante, a pesar de que algunos metales como el Fe, Cu, Zn, entre otros, son benéficos en pequeñas cantidades para el desarrollo de las plantas, se vuelven perjudiciales si estos se encuentran en exceso, influyendo drásticamente en el crecimiento, desarrollo y metabolismo de las plantas, siendo así que en la actualidad se están evaluando los NM para la remediación de sitios agrícolas y así reducir los efectos de los metales pesados sobre los cultivos. En esta línea, Li *et al.* (2020) evaluaron la adición de NP de SiO_2 a concentraciones de 0, 100, 500, 1000 y 2000 mg L^{-1} sobre las respuestas del cultivo de *Glycine max* L. expuesto a concentraciones de 0, 1 y 5 mg L^{-1} de Hg. También demostraron que la adición de NP mejoró el crecimiento de plantas y disminuyó el contenido de Hg en el tejido de los organismos, del mismo modo, se vio favorecida la síntesis de clorofila y se redujo la actividad SOD inducida por el Hg. Por otro lado, Bidi *et al.* (2021) encontraron que las NP de Fe_3O_4 a concentraciones de 25 y 50 mg L^{-1} mejoran la altura y producción de masa seca en plantas de *Oryza sativa* L. en presencia de As, además, se observó un incremento en el contenido de pigmentos fotosintéticos y se redujo la acumulación de As en las raíces y hojas, de tal manera que se mejoró el índice de tolerancia a los metales por las plantas de arroz. De igual manera, se han realizado investigaciones evaluando la aplicación foliar de nanopartículas tales como NP de TiO_2 (Lian *et al.*, 2020) y NP de Se y Si (Hussain *et al.*, 2020) como una estrategia para mejorar la resistencia de las plantas a los metales pesados.

Ante factores bióticos

Como ya se mencionó, el estrés biótico es aquel provocado por diferentes organismos vivos, como bacterias, hongos insectos, entre otros, amenazando la productividad de los cultivos, y, a su vez, poniendo en riesgo la seguridad alimentaria. Por lo anterior, existen evidencias del uso de NM en la protección de los cultivos. Por ejemplo, El-Gazzar e Ismail (2020) evaluaron, bajo condiciones de laboratorio, invernadero y campo, la eficacia de las NP de TiO_2 , Se y Ag sobre la enfermedad mancha foliar y tizón en *Solanum lycopersicum* L., causada por el hongo *Alternaria alternata*. A nivel laboratorio, los autores encontraron que las NP de TiO_2 y Se redujeron el desarrollo del hongo, mientras que

en invernadero y campo, se observó la reducción de la enfermedad en las hojas por la aspersión de NP de TiO_2 y Se, mientras que con las NP de Ag se observó un efecto moderado tanto en el ensayo de laboratorio como en condiciones de invernadero y campo. Quiterio-Gutierrez *et al.* (2019), mediante aspersión foliar, evaluaron la acción conjunta de NP de Se y Cu en un cultivo de *Solanum lycopersicum* L. infectado con *Alternaria solani*. Encontraron una disminución de la enfermedad sobre las hojas de la planta, además, se observó un incremento en la cantidad de pigmentos fotosintéticos, se indujo la actividad enzimática en las hojas e incrementó la concentración de la vitamina C, compuestos fenólicos y otros compuestos no enzimáticos en los frutos.

Hussain *et al.* (2019) sintetizaron NP de Ag mediante síntesis verde y se aplicaron de manera exógena sobre plantas de *Citrus reticulata* L., infectadas con *Xanthomonas axonopodis* pv. *citri* (enfermedad de cancro de los cítricos), se encontró que a una concentración de 30 ppm promovió la resistencia contra la enfermedad, aliviando considerablemente el estrés inducido por la infección. Asimismo, se observó que el contenido de jugo en los frutos fue mayor cuando las plantas fueron tratadas con NP de Ag, además de exhibir mayor peso del fruto y mayor rendimiento por planta. Los autores sugieren que el uso de NP de Ag biosintetizadas podrían ser empleadas como un novedoso agente de control biológico en enfermedades de los cítricos.

El uso de NM puede ser una alternativa novedosa para aliviar los efectos inducidos tanto por el estrés abiótico y biótico, sin embargo, hace falta plantear, evaluar y validar con numerosos estudios los posibles efectos de ecotoxicidad que las NP puedan provocar en las interacciones a nivel celular con el fin de no comprometer la seguridad alimentaria, la salud humana y el ambiente.

Sensores basados en NM para la detección de contaminantes en áreas agrícolas

Dentro de la agricultura, el uso excesivo y descontrolado de pesticidas ha provocado la contaminación del suelo, productos alimenticios, organismos (plantas comestibles, no comestibles, animales superiores terrestres, incluyendo humanos, y microbiota del suelo) y del ambiente, entre otros (Umapathi *et al.*, 2021). No obstante, en la última década, diversas investigaciones han demostrado los avances de la nanotecnología para la descontaminación y monitoreo de suelos en áreas agrícolas. En particular, se han diseñado nanosensores y nanobiosensores basados en NM, los cuales, posteriormente, son probados y aplicados para la detección de contaminantes orgánicos e inorgánicos en suelos y aguas (riegos agrícolas), detección de enfermedades en plantas y frutos, envasado de alimentos, entre otras actividades (Srivastava *et al.*, 2018; Gaviria-Arroyave *et al.*, 2020; Umapathi *et al.*, 2021).

En sí, un sensor químico se define como un dispositivo que transforma la información química desde la concentración de un componente de muestra hasta el análisis de la composición total, en una señal analíticamente útil. No obstante, en nanotecnología se describe como dispositivo nanométrico capaz

de conectarse a cualquier organismo, metal o compuesto, que necesite ser detectado y transmitir una señal eléctrica, mecánica, acústica, colorimétrica, térmica u óptica (Heikal y Abdel-Aziz, 2021; Thangadurai *et al.*, 2021). En este sentido, se reporta que el uso de nanosensores es una estrategia de detección rápida, fácil fabricación, con alta selectividad y sensibilidad, además de que su efecto es legible a simple vista. Por lo cual, el uso de nanosensores basados con NM simples o híbridos para la detección de contaminantes se ha convertido en una propuesta tecnológica de avanzada para la agricultura (Umapathi *et al.*, 2021).

En la literatura se cita la preocupación por una regulación y calidad del agua de riego para uso agrícola, pues se informa que la presencia de metales pesados, compuestos orgánicos y diversos contaminantes pueden acumularse en los cultivos, después de que los contaminantes son absorbidos por las raíces (Rizwan *et al.*, 2018). He *et al.* (2019) estudiaron el efecto de NP de Au para la detección de clorpirifos (CPF), los resultados mostraron que utilizando la espectroscopía Raman, las NP de Au presentaron una ultrasensibilidad, reproducibilidad y estabilidad química para la detección de CPF, con un límite de detección del contaminante por debajo de los $10 \mu\text{g L}^{-1}$. Con la intención de detectar, monitorear y predecir la calidad del agua, Lu *et al.* (2021) reportaron que el nanocompuesto $\text{ZrO}_2/\text{ZnO}/\text{MWCNTs}$ /tetrahidrato de molibdato de amonio (TMA) a través de una reacción redox, condujo a una detección de fosfato hasta un límite de detección de $2.0 \times 10^{-8} \text{mol L}^{-1}$. Sugieren que el uso de los NM probados son prometedores para la detección de fosfatos a nivel de campo. En un estudio similar, Tümay *et al.* (2021) reportaron que al utilizar los NM ferroceno-tiofeno modificados por nanotubos de carbono (FT @ CNT), mostraron una sensibilidad para la detección de los plaguicidas paratión y clorantraniliprol en tomates, manzanas y muestras de suelo. Los autores sugieren que el método electroquímico fue de fácil operación, rápido, sensible y selectivo al utilizar el material híbrido de FT @ CNT.

Desde 1970, el glifosato ha sido un herbicida que se ha utilizado en casi todo el mundo, lo cual, resulta en una preocupación para la salud pública. En efecto, diversos estudios han demostrado que este pesticida puede alojarse en células animales incluyendo las de los humanos, lo cual puede producir efectos irreversibles en el páncreas, piel e incluso genéticos (Schimpf *et al.*, 2021). En esta línea, la propuesta del uso de nanosensores es una nueva alternativa para la detención de glifosato en aguas de riego. Aparna *et al.* (2021) reportan una revisión de nano conglomerados (*nanoclusters*), las cuales consisten en NM protegidos con ligandos nanométricos orgánicos-orgánicos, destacan su potencial para la detección de pesticidas, contaminantes en alimentos, metales pesados en suelos y para el monitoreo de plantas comestibles. Por ejemplo, Hong *et al.* (2020), utilizando nanoconglomerados de oro estabilizados con papaína, por el método de detección de fluorescencia, encontraron que el nanomaterial permitió la detección visual y semicuantitativa *in situ* de residuos de glifosato en muestras de agua del grifo. No obstante, algunos nanosen-

sores son considerados específicos para la detección de pesticidas. Alvandi *et al.* (2021) demostraron que los puntos de carbono (en inglés *carbon dots* (CD)), únicamente fueron capaces de detectar los pesticidas Confidor, Dialen Super y Suplosan, pero no para los conocidos como broxoxinilo, diazinón, glifosato y deltametrina. Además, los autores afirmaron que el nanosensor a base de carbono es ultra capaz de detectar hasta 10^{-8} ppm. Diversos casos como el que se mencionó con anterioridad son reportados por He *et al.* (2021) para la detección de pesticidas en alimentos, mientras que en los reportes de Sharma *et al.* (2021) se presenta una discusión amplia sobre el uso de biosensores y nanosensores para la detección de pesticidas, metales pesados y patógenos en suelo y agua.

Los nanosensores aplicados en el seguimiento de la nutrición de los cultivos, monitoreo del estrés en plantas también se ha reportado. Wu *et al.* (2020) diseñaron SWCNT fluorescentes a través de los cuales, interconectados con hojas de plantas de *Arabidopsis thaliana*, se obtienen señales a cambios en la concentración de peróxido de hidrógeno (H_2O_2), en este caso, una molécula asociada con el estrés provocado por patógenos. Relacionado con lo anterior, una discusión más amplia se puede leer en el trabajo de Kashyap *et al.* (2019). Si bien la nanotecnología aplicada a la agricultura ha mostrado avances para el desarrollo de una agricultura ecológica y sustentable, el desarrollo y propuestas de investigación deben continuar para permitir un incremento en el conocimiento sobre el desarrollo de nanosensores y sus aplicaciones, a tal grado de poder reducir los daños ambientales y efectos tóxicos en plantas y biota del suelo.

Obstáculos y desafíos de los NM en la biota y ecología del suelo

La diversidad de microorganismos que habitan en el suelo se considera altamente influenciada por las propiedades físicas y químicas que el mismo suelo presenta (Callaham y Stanturf, 2021), siendo esto un factor determinante en el destino de los NM una vez que se depositan en el suelo. Los suelos agrícolas se han convertido en uno de los principales receptores de NP metálicas, ya sea de manera directa o indirecta, por ejemplo, a través de la adición de lodos residuales. Un caso de ello es la transferencia de las NP de Ag, cuyos usos industriales las conducen a las descargas de aguas residuales, y, a través de los lodos, se transfieren a los ecosistemas del suelo (Chen, 2018). Durante el proceso de tratamiento de aguas residuales, las NP de Ag están sujetas a diversas transformaciones, tales como la generación de sulfuros de plata amorfo (Ag_2S) con propiedades diferentes a su contraparte cristalina Ag_2S , lo cual los hace biodisponibles para los microorganismos, traducándose en la inhibición del proceso de oxidación del amonio presente en el suelo (Kraas *et al.*, 2017).

La naturaleza multifacética del suelo influye en el destino de los NM, principalmente en características como el pH y la fuerza iónica, debido a que la introducción de OH^- afecta directamente el potencial Zeta en las NP.

Por otro lado, existen procesos fisicoquímicos que ocurren cuando los coloides migran en medios porosos, como la adsorción que implica adhesión, deposición y liberación. No obstante, son las propias características de los coloides las que dirigen su transporte en medios porosos, dependiendo del tamaño y la forma. Cuanto menor sea el tamaño de las partículas, más fácil resulta su migración a través del medio poroso (Jiang *et al.*, 2017). Wang *et al.* (2015) estudiaron el transporte de nanopartículas de plata cubiertas de polivinilpirrolidona (AgNP-PVP) a través de tres tipos de suelo: franco arcilloso rojo (RS), franco arenoso fluvoácuico (FS), y franco huangni (HS); utilizando la técnica de columnas saturadas de agua, evaluaron principalmente los efectos de los cationes Ca^{+2} y K^+ presentes en el suelo, con efecto acoplado de Ca^{+2} con ácido húmico (AH), a concentraciones de 10 mg L^{-1} de AgNP a una velocidad de Darcy de $0.182 \text{ cm min}^{-1}$. Los resultados indicaron que existe mayor retención de AgNP-PVP en presencia de Ca^{+2} en comparación con K^+ , sin embargo, la presencia de ácido húmico debilitó la movilidad de las AgNP-PVP conforme el aumento de Ca^{+2} , efecto adjudicado a la formación de agregados (AH-Ca-AgNP-PVP), más aún, la movilidad de las nanopartículas se correlacionó positivamente con el pH. La movilidad de AgNP-PVP se mantuvo en el orden $\text{RS} < \text{FS} < \text{HS}$.

Efectos de los NM en el suelo

Los NM en el ecosistema del suelo interrumpen la arquitectura del suelo y las actividades rizosféricas, influyen de manera dinámica sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo como el pH, la presencia de carbono orgánico disuelto, la disponibilidad de nutrientes y las actividades enzimáticas. En el caso de las NP de hierro, estas se han caracterizado por su capacidad redox. En particular, los óxidos de hierro tienden a hidratarse en el sistema acuoso del suelo, formando grupos Fe-OH que cubren la superficie de las partículas. Los óxidos de hierro hidratados presentan un carácter anfótero, es decir, son capaces de ionizarse, dependiendo del pH de la solución, de esta manera, los suelos tienden hacia la acidificación o alcalinización (Illés y Tombácz, 2006). Las NP de Fe^0 (nZVI) desempeñan un doble papel en el suelo al aumentar el carbono orgánico disponible, así como la disponibilidad del nitrógeno; por otra parte, las nanopartículas de Fe_3O_4 y Fe_2O_3 inducen una ligera acidificación y reducen la disponibilidad de nutrientes del suelo (Zhou *et al.*, 2012). Dentro de las interacciones con los componentes orgánicos del suelo, la materia orgánica disuelta tiene un papel importante en los procesos biogeoquímicos terrestres; sin embargo, por la presencia de grupos funcionales, tales como OH^- , cetonas, quinonas, carboxilos, metoxilos y aldehídos, tiende a adsorberse en la superficie de las nanopartículas de hierro, cuya tasa de adsorción varía de la siguiente manera: $\text{Fe}_3\text{O}_4 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{nZVI}$. Desde otro punto, esta adsorción de componentes orgánicos en la superficie de las NP de hierro es conocida como envejecimiento de los nanomateriales de hierro, donde la corrosión de nZVI se traduce en la presencia de Fe_3O_4 , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ y $\alpha\text{-FeOOH}$ (Hui *et al.*, 2021).

En el caso de las NP de ZnO, se ha observado que afectan directamente el pH del suelo, en el entendido de que, el pH aumenta mientras que la disponibilidad del Zn disminuye, efecto que puede ser explicado por los procesos de absorción de iones en la fase sólida de los suelos, sobre todo de aquellos ricos en carbonatos. De esta manera, en los suelos donde el pH es bajo se incrementa su disponibilidad y, a su vez, se relaciona con bajo contenido de materia orgánica (Romero-Freire *et al.*, 2017), siendo las sustancias poliméricas extracelulares (SPE) un tipo de materia orgánica presente en el suelo, afectan directamente la agregación de NM, al exhibir cargas superficiales y grupos funcionales capaces de cambiar la interacción entre NM y partículas minerales del suelo, definiendo la *heteroagregación*. A fin de evaluar este efecto, Zhao *et al.* (2022) estudiaron la heteroagregación de las nanopartículas de CeO₂ a diferentes partículas minerales, como goethita (GO) y montmorillonita (ML) ante la presencia de SPE. Donde la superficie de la goethita es de carácter liso y contrariamente la superficie de la montmorillonita, que suele ser rugosa, lo que puede proporcionar mayor área de contacto. Los resultados indicaron que la adición de SPE logra inhibir la combinación CeO₂ y GO, al no detectar NP de CeO₂ en la superficie del mineral, mientras que, para la montmorillonita, la adición de SPE provocó agregados más aislados y pequeños, presentando el cambio morfológico de las heteroagregaciones en el sistema binario nanomaterial-mineral. Por ende, la presencia de SPE puede promover la migración de NP de CeO₂ en el ecosistema del suelo. Por otra parte, se ha observado el aumento significativo de titanio en suelos de textura arenosa y arenolimosas después de la adición de NP TiO₂, teniendo, estos suelos de textura gruesa, menor contenido de carbono orgánico y menor capacidad de intercambio catiónico, donde las NP de TiO₂ se muestran mayormente disponibles, contrario a los suelos con mayor contenido de arcilla, al tender a presentar un tamaño de poro más pequeño y un área de superficie más grande, lo cual aumenta tanto las interacciones electrostáticas, traduciéndose en menor transporte de los NM hacia a los lixiviados del suelo (Wang *et al.*, 2016). Larue *et al.* (2018) evaluaron el efecto de traslocación de las NP de TiO₂ dentro de un agroecosistema observando que en suelos con un contenido de arcilla superior al 6% junto con un contenido de materia orgánica superior al 1.5% conduce a un factor de translocación del suelo a las hojas de las plantas por debajo del 2.5% (es decir, por debajo de 13 mg Ti kg⁻¹ hojas secas), lo que sugiere un bajo riesgo de contaminación del cultivo de trigo evaluado.

Los NM y los organismos del suelo

Los atributos biológicos del suelo son quizás el aspecto más complejo y difícil de abordar desde la ecología de los suelos. La calidad del suelo se relaciona ampliamente con la microbiota que alberga, pues esta desempeña acciones que le permiten al suelo funcionar como un ecosistema vivo, capaz de sustentar las plantas (Stevens, 2018). Por ello, la biota del suelo ha sido relegada al papel de “indicador” de la calidad de los suelos (Callahan y Stanturf, 2021).

El efecto negativo de los NM sobre los microorganismos benéficos del suelo aún no se ha descrito ni comprendido totalmente, por ser los efectos tan diversos como lo son los diseños y usos de estos materiales. Las NP metálicas se utilizan principalmente como agentes antimicrobianos en diversos giros industriales, en consecuencia, su ingreso al ecosistema del suelo puede llegar a generar cambios en la diversidad taxonómica (Abbas *et al.*, 2020). Estos cambios, presentes después de la acción potencial de los NM, se pueden evaluar en dos direcciones: la primera, hacia la diversidad funcional, es decir, la suma de los procesos ecológicos o la capacidad de utilizar diferentes sustratos, como el carbón mineral, y, en una segunda dirección, hacia la diversidad genética, en tres niveles: especie, número de especie y diversidad comunitaria (Griffiths *et al.*, 2016). Estudios previos han evaluado la sensibilidad de las bacterias y hongos ante la presencia de NP de Ag, dentro de un intervalo de exposición de 1 a 100 mg kg⁻¹, donde el filo bacteriano más abundante suele ser *Protobacteria*, con las clases *Betaproteobacteria*, *Gammaproteobacteria* y *Deltaproteobacteria*, mientras que los hongos del filo *Ascomycota* permanecen abundantes, contrariamente a la reducción que sufre el filo *Oomycota*. En cuanto a la funcionalidad, se ha observado que este NM produce la inhibición de la actividad deshidrogenasa a concentraciones de NP de Ag ≥ 1 mg kg⁻¹ (Macůrková *et al.*, 2021). Por otra parte, la presencia de NP de Ag en concentraciones de 20 mg g⁻¹ tiene un efecto nulo en cuanto a la población bacteriana, según los filos: *Acidobacteria*, *Actinobacteria*, *Bacteroidetes* y *Firmicutes* (Abdulsada *et al.*, 2021). En cuanto a las especies promotoras del crecimiento vegetal, tales como, *Bacillus thuringiensis*, *Pseudomonas mosselii*, *Azotobacter chroococcum* y *Sinorhizobium meliloti* se muestran tolerantes ante dosis de hasta 3,000 $\mu\text{g mL}^{-1}$ de NP de CuO, TiO₂ y Al₂O₃, no obstante, se manifiestan sensibles ante dosis menores a 1,500 $\mu\text{g mL}^{-1}$ de NP de Ag y ZnO (Ahmed *et al.*, 2020). A fin de estudiar el impacto de AgNP en protistas del suelo, se han evaluado las reacciones de *Acanthamoeba*, misma que presenta pérdida de la actividad metabólica ante dosis en el intervalo de 600 $\mu\text{g L}^{-1}$ a 20 mg L⁻¹ de NP de Ag (Grün *et al.*, 2017). Se ha reportado que la adición de NP de TiO₂ en suelos de textura arcillosa afecta directamente la respuesta de los taxones pertenecientes a *Acidobacteria* y *Verrucomicrobia*, asimismo, irrumpe en la actividad enzimática tras reducir la actividad de la deshidrogenasa (Zhai *et al.*, 2021). De manera contraria, se han encontrado unidades taxonómicas operativas (OTU) centrales promovidas por las altas concentraciones de TiO₂, tal es el caso de las OTU *Planomicrobium*, *Exiguobacterium* y *Catellatospora*, filos *Firmicutes* y *Acidobacteria* que podrían sobrevivir en condiciones contaminadas por un alto rendimiento de limo extracelular y sideróforos (Zhai *et al.*, 2019).

Los NM, las enzimas y los ciclos biogeoquímicos

Las enzimas del suelo son un componente intracelular y extracelular (cuando son liberadas) de los organismos del suelo. La evaluación de las enzimas en suelo ha demostrado potencial para la detección temprana de alteraciones

dentro de los ciclos biogeoquímicos, claves en la ecología de los suelos (Peyrot *et al.*, 2014). Por caso, la ureasa, la fosfatasa y la β -glucosidasa son enzimas producidas por plantas y microorganismos de importancia primordial por su papel en los ciclos del C, N y P en varios ecosistemas del suelo. Donde la ureasa es una enzima extracelular sensible a la contaminación, usada como un indicador del estrés en ambientes hostiles para los microorganismos, principalmente aquellos involucrados en el ciclo del nitrógeno (Qian *et al.*, 2016). Li *et al.* (2017) han dado a conocer que un incremento en la concentración de NP de CeO_2 en el suelo presenta resultados negativos referidos a la actividad de la enzima ureasa, observándose un efecto de inhibición a concentraciones $\geq 100 \text{ mg kg}^{-1}$; contrariamente, se ha demostrado que la actividad de la fosfatasa incrementa en presencia de NP de CeO_2 (Li *et al.*, 2017). También, se ha observado que las NP de CuO tienden a disminuir las actividades de la peroxidasa y el polifenol oxidasa como efecto de la liberación de los iones de Cu, mismos que se conocen como catalizadores de la generación de ROS, lo cual resulta en estrés oxidativo de los microorganismos y, en consecuencia, disminuye la secreción de enzimas en el suelo (Qu *et al.*, 2022). Por lo anterior, se deduce que la reducción de la actividad enzimática es la respuesta esperada ante la presencia de unas sustancias sumamente tóxicas (Kim *et al.*, 2011).

Se sabe que la nitrificación es un proceso esencial, en la cual, las comunidades de bacterias nitrificantes han sido de utilidad para estudiar los efectos tóxicos de los NM. Las propiedades microbiológicas y bioquímicas del suelo, incluida la biomasa microbiana, bajo el análisis de concentraciones del C y N, la tasa de respiración basal, el cociente metabólico microbiana y las actividades enzimáticas son indicadores importantes de metabolismos microbiológicos, relacionados con el estrés ambiental (Xin *et al.*, 2020). Al respecto, Nishu *et al.* (2020) evaluaron la respuesta de las comunidades microbianas del suelo ante NP de ácido láctico-co-glicólico (PLGA), con diferencia de carga positiva y negativa, observando que estas últimas tendían a presentar menor unión a las células bacterianas en comparación con las PLGA de carga positiva, más aún, el potencial Zeta de los NM no mostró impacto sobre la nitrificación. La oxidación del amoníaco y nitrito se inhibió más del 50% bajo concentraciones de $0.05 \text{ mg NM L}^{-1}$. Se ha reportado que la eutroficación en humedales es un estado que se intensifica cuando las NP de Au y Cu se combinan con el enriquecimiento de nutrientes, presentándose mayor floración de algas (Simonin *et al.*, 2018). Caso contrario, la presencia de NP de Ag en concentraciones $> 100 \text{ mg kg}^{-1}$ inhibe la actividad enzimática durante el ciclo del nitrógeno (Xiaohong *et al.*, 2021). La disminución de la mineralización del nitrógeno y el carbono también ha estado presente en tratamientos de suelo con NP de óxidos de hierro, donde las espinacas, como cultivo control, logran recuperar entre el 32 y 53% del nitrógeno aplicado (Kamran *et al.*, 2020), siendo la desnitrificación un proceso de biorreducción secuencial que mantiene el equilibrio del nitrógeno, proceso mayormente catalizado por cuatro enzimas: nitrato reductasa (NAR), nitrito reductasa (NIR), óxido nítrico reductasa (NOR) y óxido

nitroso reductasa (NOS). Otros estudios han demostrado que, las NP de óxido de Cu a concentraciones de 10 y 100 mg kg⁻¹ no inhiben significativamente la desnitrificación, mientras que, con dosis superiores a ≥ 500 mg kg⁻¹ provocan un aumento de la acumulación de NO₃⁻, lo cual disminuye la tasa de emisión del N₂O (Zhao *et al.*, 2020).

Por otra parte, el ciclo biogeoquímico del azufre en el sistema del suelo está estrechamente relacionado con los procesos de migración de los metales pesados, resultando de interés estudiar su influencia en la migración de las NP de CuO depositadas en el suelo. Se ha observado también la formación de diversos compuestos de cobre en los coloides, predominando Cu₂S. Sun *et al.* (2020) observaron que la fertilización con azufre tuvo efecto en el potencial Z de los coloides al incrementar su valor en la región de la rizosfera, reportando coloides de Cu-Citrato en los poros del suelo. Baysal y Saygin (2018) estudiaron la disponibilidad de los oligoelementos en suelos tratados con NP ZnO bajo concentraciones de 0, 1.0 y 20 mg, observando diferentes respuestas según el elemento. El contenido de Al disminuyó en un 40% en la concentración de 20 mg de ZnO, por el contrario, la concentración de Ca incrementó, mientras que las concentraciones del Cu y el Fe disminuyeron. En este último, el efecto se correlacionó negativamente con el contenido de ZnO. La disponibilidad del Mg disminuyó aproximadamente en un 50% debido a un aumento en la concentración de iones de Zn y Ca en el suelo.

Los NM en la cadena trófica: interacciones suelo-planta-humanos

De acuerdo con Cota-Sánchez *et al.* (2015), es y será difícil conocer el destino final de los NM manufacturados e incluso su comportamiento, debido, principalmente, a la falta de información acerca de los fenómenos y mecanismos involucrados en la cadena trófica o en cualquier vía de interacción entre el suelo, las plantas y los humanos, por ejemplo, en sistemas acuáticos o en agricultura. Los seres humanos se encuentran también expuestos de manera natural o inducida y no intencional, y probablemente hasta intencional; sin embargo, ese tipo de exposiciones no es el objetivo de esta sección. En diversas situaciones, a los NM se les considera como materiales peligrosos debido a trabajos que los han reportado con efectos adversos (Cota-Sánchez *et al.*, 2015; Brown *et al.*, 2001), como es el caso de algunos polímeros, como el poliestireno a diferentes tamaños de partículas, al estudiar sus efectos. De acuerdo con Brown *et al.* (2001), se reporta un incremento en la entrada de neutrófilos en el pulmón de las ratas después de una instilación de partículas de 64 nm en comparación con las NP de 202 y 535 nm (Brown *et al.*, 2001), esto se debe no solo al efecto del tamaño del material, sino, muy probablemente, al efecto de la naturaleza del material y sus propiedades; por un lado, es un material sintetizado, químicamente desconocido para la naturaleza de las células (corriendo siempre el riesgo de que estos materiales sean reconocidos como cuerpos extraños e invasores), y, por otro, son estudios en condiciones cerradas, esto es, se trata de un evento inducido y, en cierto grado, fuerza-

do para las células, de manera que carecen de la información completa como sistema para reconocer un cuerpo extraño como lo es un NM. En el caso de las NP metálicas, como Cu, ZnO y CeO₂, donde se tiene la preocupación de su acumulación o depósito en suelo, se especula que para el Cu (más del 95%) utilizado a nivel mundial, termina en ambientes como el suelo y sedimentos de cuerpos acuáticos en concentraciones de hasta 500 µg kg⁻¹, para el ZnO se estima en 16 µg kg⁻¹, y para el CeO₂, desde < 0.01 hasta 4.3 mg kg⁻¹ (Rajput *et al.*, 2020), sin mencionar que sean un verdadero problema para la salud o para la cadena trófica. Rajput *et al.* (2020) señalan que la acumulación de algunas NP puede alterar algunos procesos fisiológicos de las plantas y pueden afectar la integridad celular y subcelular de la organización de los organelos, modificación de proteínas, lípidos u ácidos nucleicos por la generación de radicales hidroxilos (Rajput *et al.*, 2020), no obstante, solo presentan asunciones como parte de una postulación de posibles efectos.

Las NP metálicas han sido ampliamente aplicadas en el uso de celdas solares, catálisis, semiconductores, tratamientos médicos, tratamiento de aguas residuales, y remediación ambiental por sus propiedades fisicoquímicas (Peng *et al.*, 2020). Según Peng *et al.* (2020), se estimó una producción mundial de NP de óxidos metálicos en más de 260,000 toneladas. Por otro lado, se asume que la mayoría de las NP se pueden aglomerar en el suelo, liberar iones metálicos y ROS, que pueden ser absorbidas por las plantas suponiendo una potencial amenaza para la salud humana vía cadena trófica, según Peng *et al.* (2020), y, citan que aplicar NP de ZnO y CuO al suelo promueve la acumulación de Zn y Cu en papa dulce, sin realmente mencionar los posibles efectos adversos para la salud.

Por otro lado, se han investigado los efectos de las NP con microplásticos (MP) en el crecimiento de las plantas y las comunidades de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en suelo adicionado con NP de ZnO, donde Yang *et al.* (2021) justifican que los micro plásticos y las NP han sido una preocupación ambiental a nivel mundial y que, sin embargo, poco se sabe de los sistemas suelo-planta. Ellos estudiaron los efectos de dos MP, polietileno de alta densidad (HDPE, no degradable) y ácido poliláctico (PLA, biodegradable) en el crecimiento del maíz y las comunidades de HMA del suelo enriquecido o no con NP de ZnO. Sus resultados mostraron que, tanto HDPE como bajas dosis de PLA promueven el crecimiento de las plantas de maíz, a diferencia de las altas dosis de PLA, que disminuyen significativamente el desarrollo de la parte aérea, desde el 16 al 40% y la biomasa de la raíz (20 a 50%), demostrando que a altas dosis de PLA se presenta una fuerte fitotoxicidad, mientras que las NP no mostraron efectos significativos en el crecimiento de las plantas, pero sí registraron acumulación de Zn en ellas. Con la presencia de los microplásticos, se incrementó la concentración de Zn en raíces, pero disminuyó la traslocación en la parte aérea. En cuanto a las comunidades de micorrizas, los micro plásticos y las NP de ZnO influyeron individual y conjuntamente en la composición y diversidad de la comunidad de hongos AM, en

particular la abundancia relativa de los géneros dominantes. Con respecto al pH del suelo, este incrementó debido a la producción de ácido láctico por degradación de PLA, hecho que representa claramente efectos no previstos por quienes fabrican polímeros orgánicos, sin importar que sean biodegradables y a que llevasen a alterar un nicho ecológico favoreciendo bacterias u organismos degradadores de lactatos. Yang *et al.* (2021) concluyen que el incremento de MP y NP (como contaminantes) puede tener un importante impacto ecológico en las plantas, en la calidad de las mismas, y en la constitución y diversidad de las comunidades microbianas, siendo las consecuencias inciertas para los agroecosistemas.

El trabajo de Wei *et al.* (2021) revela la interacción y acumulación de Au, dos estructuras atómicas de oro, NP_{Au} & Au⁺³, a diferentes concentraciones en interacción con plantas de mostaza y lechuga vía raíz. Los resultados fueron: a) las NP de Au se acumularon intactas, es decir, sin un cambio de estado de oxidación o algún otro tipo de transformación; b) ambas plantas, lechuga y mostaza, presentan una toma diferencial y los mecanismos de “bioacumulación” son diferentes, y, c) las eficiencias de acumulación para ambas plantas son diferentes para las dos diferentes formas alotrópicas del Au (NP e iónica), donde las plantas fueron más dadas a acumular la forma iónica que las NP_{Au}. El estudio no revela o establece alguna hipótesis en cuanto a lo concerniente a la cadena trófica, pero aporta hechos que nos permiten ver los mecanismos de acumulación de las diferentes alotropías al adicionar un metal.

Bajo la asunción de la extendida o amplia exposición de ecosistemas acuáticos a las NP metálicas con impactos adversos en la salud humana como una colosal preocupación a nivel mundial, Agayeva *et al.* (2020) han estudiado la “bioacumulación” y localización de las NP de magnetita (Fe₃O₄) en los orgánulos celulares de la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum, 1792), donde las NP fueron asimiladas por Elodea (*Elodea canadensis*, planta acuática común de acuarios de agua dulce), que a su vez alimentó a caracoles (*Melanopsis praemorsa*, caracol de agua dulce) y estos a las truchas; como seguimiento de las NP como parte de una cadena trófica, se examinaron los intestinos e hígados por microscopía electrónica de transmisión y luz. Los resultados muestran que las NP se encontraron en el citoplasma y otros organelos de las células (mitocondrias y lisosomas) que fueron absorbidos a través de las vellosidades de las células epiteliales de la túnica mucosa del intestino y otras NP pasaron a través por los vasos de la lámina propia de la túnica mucosa, alcanzando los sinusoides del hígado a través del torrente sanguíneo, por lo que la acumulación fue en el endotelio de los sinusoides al citoplasma de los hepatocitos del hígado, también se registró acumulación en células epiteliales, las mitocondrias y los lisosomas, que de acuerdo con los autores, revela un grado de transparencia del patrón con ligera “indecisión” y aunque aseveran que contribuye en el entendimiento de los efectos fisiológicos de las NP de Fe₃O₄ en la trucha arcoíris, no se muestran evidencias de daños toxicológicos o algún otro tipo, debido a que es un estudio enfocado a

determinar la acumulación de NP en condiciones determinadas; dado lo cual, ellos mismos proponen seguir las investigaciones sobre las vías de paso en la cadena trófica de estas NP e identificar los factores que influyen dichos mecanismos como para evitar tales “drásticas” preocupaciones de salud, como ellos afirman (Agayeva *et al.*, 2020). Incluso, con la información reportada sobre los beneficios y riesgos de los NM en los dos últimos años, se indica que la preocupación es latente, dado el número elevado de resultados contrastantes sobre plantas, organismos del suelo y los daños que pueden ocurrir en los humanos. En una revisión detallada que antecede el presente trabajo, realizado por nuestro grupo de investigación, demostramos que, de 182 artículos seleccionados (siguiendo la metodología Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis, PRISMA, por sus siglas en inglés), 73 artículos sobre plantas mostraron el 34.24% de efectos negativos y 43.83% efectos positivos. Además, de 58 y 51 artículos que evaluaron los efectos de NMs sobre la mesofauna y macrofauna del suelo, el 79.31% y el 54.9% de esos estudios, respectivamente, ocasionaron efectos dañinos en los organismos del suelo (Pérez-Hernández *et al.*, 2021).

Por lo anterior, en la literatura se encontrarán casos desde su toxicidad hasta efectos positivos y benéficos de los NM, esto podría tener una explicación, los estudios se realizan tomando partes del complejo universo al que pertenecen los NM y las NP, por lo cual no se han podido encajar en un modelo general por ahora. Otro importante factor es que la nano escala es un reto para poder dar seguimiento a estos materiales (NM y NP) para su análisis y monitoreo en tiempo real en cualquier sistema de estudio. Sin duda, la escala del tamaño también trae consigo cambios en las propiedades y características químicas, físicas, fisicoquímicas y biológicas con respecto a las propiedades que presentan en masa los mismos materiales, lo que complica un reto en el modelo de entendimiento. Se requiere de una investigación más sistemática y multidisciplinaria en condiciones ecológicamente relevantes. Por lo que solo podemos hacer asunciones e hipótesis para experimentos de corto alcance.

NM verdes para la agricultura y el ambiente

En la síntesis verde de los NM se aplican los principios de la química verde, la cual se define como la aplicación de metodologías que reducen o eliminan el uso de materiales y sustancias peligrosas, tanto en el diseño, como en la manufactura e implementación de los productos químicos. Por lo tanto, la nanotecnología verde para la producción de NM se considera sustentable, económica, segura, y amigable para el ambiente (Rawtani *et al.*, 2020).

La síntesis verde de los NM tiene dos metas principales: i) creación de NM para aplicaciones ambientales por medio de la prevención de daños por contaminantes conocidos o por la incorporación de NM en tecnologías ambientales para limpiar ambientes contaminados, y, ii) producción de NM que puedan minimizar los daños de actividades antropogénicas para la salud humana y el am-

biente. La síntesis verde, o biosíntesis de NM, involucra procesos Redox, donde los organismos o sus metabolitos reducen iones metálicos a NM estables utilizando, por ejemplo, sus enzimas reductasa dependientes de la nicotiamida-adenina dinucleótido fosfato (NADPH). Los NM sintetizados por métodos biológicos son conocidos también como nanomateriales biogénicos. Estos NM tienen alta biocompatibilidad y sensibilidad, además de diversas aplicaciones en áreas biomédicas, agricultura, sectores electrónicos, así como en remediación ambiental (Ahmed *et al.*, 2022).

Algunos NM verdes tienen aplicaciones como adsorbentes, catalizadores, agentes emulsificantes, y componentes de sensores. En su aplicación en sistemas biológicos se ejemplifica con los biosensores para la detección de diferentes biomoléculas, patógenos, compuestos bioactivos presentes en muestras biológicas. También pueden ser utilizados en aplicaciones como biomédicas, industriales, industria automotriz, bioimagen, empaçado de alimentos, y medicamentos (Rawtani *et al.*, 2020). Uno de los considerados como NM verdes, encontrado naturalmente en derivados de las paredes celulares de plantas, es conocido como la nanocelulosa (NC), un polímero abundante en la naturaleza y un componente significativo en la biomasa lignocelulósica. La NC puede ser clasificada debido a su cristalinidad, morfología, tamaño de partícula, fuente, método de extracción y se diferencia en 3 tipos: celulosa nanocristalina (CNC), celulosa nanofibrilada (CNF), y nanocelulosa bacteriana (NB) (Rawtani *et al.*, 2020).

Como se mencionó anteriormente, algunos NM verdes son aplicados como nanoadsorbentes, y son obtenidos a partir de agentes naturales como extractos de plantas, frutas y microorganismos, minimizando los efectos tóxicos causados por el uso de reactivos químicos en los procesos de síntesis nanoadsorbentes convencionales. Algunas de sus aplicaciones son la remoción de hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPA, o PAHs, por sus siglas en inglés) (Bolade *et al.*, 2020). En la actualidad, se continúan desarrollando metodologías para la remoción de HPA, principalmente, la descontaminación de aguas residuales industriales, así como las provenientes de la industria de los aceites. Algunos NM como los grafenos han llamado la atención para su uso en la adsorción de HPA, los grafenos exhiben una gran área superficial, así como una mayor resistencia mecánica, presentando además un bajo costo de producción, haciéndolos viables para ser utilizados en el tratamiento de efluentes por procesos de adsorción (Chen y Huang, 2020).

Los compósitos verdes son compuestos poliméricos o polímeros derivados de la naturaleza y pueden ser procedentes de origen renovable o biológico. Estos polímeros son utilizados como agentes de protección en empaques, ya que, al adicionar nanoarcillas y NP en sus complejos poliméricos (compósitos poliméricos), mejora la actividad antibacteriana del material. Las ventajas que presentan estos nanocompósitos poliméricos (NCP) es la amplia área superficial, además de presentar una mejor biodegradabilidad y biocompatibilidad (Rawtani *et al.*, 2020).

Los NCP, como materiales adsorbentes, son aplicados para la adsorción de iones metálicos tóxicos contenidos en muestras de agua, así como la remoción de especies aniónicas, además de residuos de antibióticos presentes en las muestras. Los súper nanoadsorbentes se obtienen cuando se combinan los NM magnéticos y son mezclados con NCP, los cuales son utilizados como esponjas para tratamientos de aguas residuales. Otro ejemplo de aplicación de los NCP es en la remoción de iones de metales pesados, en la cual se modificaron con perodato para la oxidación y con bisulfito para la sulfonación, esto con la finalidad de una mayor adsorción de iones de Pb (II) (Rawtani *et al.*, 2020).

Las membranas adsorbentes nanofibras son otro tipo de NM verdes, fabricadas a partir de la sililación de acetato de celulosa funcionalizadas con grupos aminos que se encuentran anclados a la superficie, se aplican para la remoción de cromo en agua. Las nanofibras utilizadas se extraen a partir de la fase sólida y se analizan para la determinación de metales traza. El intervalo de adsorción del contaminante dependiente del tamaño de la nanofibra, el grado de hidratación de la misma, y de la constante de enlace (Nomngongo *et al.*, 2013; Rawtani *et al.*, 2020).

Otros nanomateriales verdes son los nanopuntos de carbono, los cuales se pueden obtener de la pitahaya (*Hylocereus undatus*, (Haworth) Dr. Hunt, 2017), utilizados en aplicaciones fotocatalíticas. Arul *et al.* (2017) aplicaron estos NM para la degradación catalítica de azul de metileno. Utilizaron el complejo nanopuntos de carbono como catalizador y el borohidruro de sodio (NaBH_4) como agente reductor. Se observó que este complejo presentó una excelente actividad catalítica para la reducción de azul de metileno por el borohidruro de sodio, logrando la remoción del mismo (Arul *et al.*, 2017).

Nithya *et al.* (2018) reportan que el óxido de hierro (NM) se utilizó para la remoción de níquel en soluciones acuosas, donde se sintetizaron a partir de un extracto del fruto del arbusto *Lantana cámara* L., estudiaron los efectos en el pH, diferentes concentraciones de níquel (50, 100, 200, 300, 400, 500 y 600 mg L^{-1}), dosis del adsorbente, tamaño de partícula, tiempo de contacto y temperatura en la remoción del metal. En un inicio se observó que la adsorción del níquel se incrementó rápidamente, pero con el paso el tiempo se vio disminuido, debido a la baja disponibilidad de los sitios activos para adsorción del níquel, situación comparable con otros nanoadsorbentes de metales (Nithya *et al.*, 2018).

Respecto a la síntesis verde de la NP de Ag, existen reportes de su producción a partir de las plantas de sábila (*Aloe vera* L.), semillas de café (*Coffea arabica* L.), planta de gadabani (*Trianthema decandra*), frijol kulthi (*Macrotyloma uniflorum* [Lam.] Verdc.) y planta rosa japonesa (*Rosa rugosa* Thunb). Además de las plantas antes mencionadas, se sabe que los biopolímeros provenientes del quitosano y otras fuentes microbianas pueden ser materias primas potenciales para la síntesis verde de NP de Ag (Tarannum *et al.*, 2019).

En cuanto a la aplicación ambiental de NM, se ha implementado nanotecnología en la producción de energía sustentable. Como parte de los NM apli-

cados en la remediación del ambiente se encuentran los MWCNT, sintetizados a partir de desechos orgánicos, los cuales se han aplicado para adsorber o recuperar materiales radioactivos como U^{6+} , Eu^{3+} y Th^{4+} , considerados elementos importantes para la producción energética (Brar *et al.*, 2021).

También se han utilizado NP biogénicas, como las NP de Cu sintetizadas a partir de residuos de extracto de tilia (*Tilia sp. L.*) para la remoción de fármacos como diclofenaco, ibuprofeno y naproxeno contenidos en aguas residuales, se demostró que, con el uso de 10 mg de NP de Cu a pH de 4.5 y 298 K por 60 min, se obtuvo una eliminación del 91.4%, 74.4% y 86.9%, respectivamente (Husein *et al.*, 2019).

La aplicación de nanocatalizadores sintetizados a partir de métodos verdes, utilizados para la remediación de contaminantes e iones metálicos en ambientes acuáticos, son tecnologías innovadoras para la remediación de agua contaminada. No obstante, los informes sugieren que es importante evaluar el impacto que pueden tener hacia el ambiente. De hecho, aún se estudia la manera de disminuir los costos de producción, mejorar la capacidad de adsorción, la selectividad del método de fabricación, y la reciclabilidad de los NM producidos a partir de esta síntesis verde (Nasrollahzadeh *et al.*, 2021).

Como biomaterial, se menciona que el quitosano es utilizado como soporte para algunos NM, pues es biocompatible, biodegradable, no es tóxico, es altamente adsorbente, así como la posibilidad de ser utilizado como reservorio de protección de componentes activos aplicados al suelo como: i) fertilizantes, ii) herbicidas, iii) fungicidas, iv) insecticidas, y, v) micronutrientes; también, ha mostrado ser eficaz para controlar la liberación de ingredientes activos, como los antes mencionados, mejorando la calidad y cantidad de los productos, ya que se incrementa la tolerancia de la planta hacia el estrés ambiental. Además, el quitosano tiene un papel fundamental en la respuesta de defensa de las plantas, mejorando su crecimiento y producción, así como el crecimiento de las semillas, el mecanismo de fotosíntesis, la activación de las hormonas de las plantas, y la captación de nutrientes (Kumaraswamy *et al.*, 2018; Ioannou *et al.*, 2020). Otra aplicación que se le ha dado a este NM es como nanosensor.

Nandhini *et al.* (2019) sintetizaron NP de ZnO a partir de un extracto acuoso de margarita falsa (*Eclipta alba L.*), tanto en condiciones de laboratorio como de invernadero, observaron que la aplicación de las NP mejoró la germinación y altura en la planta de mijo (*Panicum milacium L.*). Además, las NP fueron aplicadas en ensayos esporangicidas, demostrando que con 50 ppm de NP de ZnO fue suficiente para inducir plasmólisis e inhibición de la germinación de las zoosporas de *Sclerospora graminicola* (Nandhini *et al.*, 2019).

Mankad *et al.* (2020) cuando sintetizaron NP de Ag a partir de neem (*Azadirachta indica A. Juss.*), a dos concentraciones del extracto de la hoja de la planta (10 y 20 mg L⁻¹), a diferentes tiempos de duración a la luz del sol, observaron actividad antibacteriana sobre el fitopatógeno *Xanthomonas oryzae* pv. *Oryzae* (Xoo). Además, el efecto de las NP de Ag demostró una mejor ac-

tividad microbiana comparada contra 200 mg L⁻¹ de estreptociclina (Mankad *et al.*, 2020).

Los NM obtenidos a partir de síntesis verde han llamado considerablemente la atención, al disminuir los costos y tiempos de fabricación de las diversas NP, además, han tenido efectos significativos tanto para la remoción de contaminantes, o como antimicrobianos contra microorganismos potencialmente infecciosos para plantas de importancia agrícola, en comparación con productos químicos convencionales. Los resultados pueden indicar que, con la síntesis verde o ecológica es más probable llegar a la sustentabilidad, con NP que pueden ser reutilizables y amigables con el ambiente.

Regulaciones de los NM para el uso agrícola y ambiental

Debido a que el sector agrícola y ambiental cuenta con una serie de desafíos como elevar la eficiencia en el crecimiento de cultivos, lograr una liberación controlada de micro y macro nutrientes y un manejo eficiente y planificado de los recursos, se han desarrollado nuevas tecnologías para buscar soluciones para los problemas actuales. La nanotecnología es atractiva para aumentar la eficiencia agrícola, y hoy en día se emplean diferentes NM en la industria agroalimentaria (Ashraf *et al.*, 2021; Nuruzzaman *et al.*, 2016). Younis *et al.* (2021) argumentan que compañías privadas, organizaciones y universidades han comercializado NP para el sector agrícola y existen al menos 32 productos comerciales conformados por NP para su aplicación, algunos ejemplos son:

- Nanosensores producidos en 2007 por la Universidad de Crete, Grecia, para la detección de plaguicidas con un nanobiosensor basado en liposoma.
- Fertilizantes macronutrientes cubiertos con NP de ZnO (2012) por la Universidad de Adelaide, que permiten mejorar la absorción por las plantas y la liberación de nutrientes en sitios específicos.
- En el 2015, nano-nutrientes (NP de ZnO y TiO₂) por la Universidad de Washington que potencian el crecimiento y los antioxidantes de los tomates.
- NASCO Bio NPK fertilizer producido por la Nano Agro Science Cooperative Society, Ltd., India Tropical Agro en India.
- NanoStressTM, NanoZnTM y Novaland-Nano, fertilizantes producidos en Taiwán por Land Green & Technology Co., Ltd.

En relación con lo anterior, existen más de 400 empresas dedicadas a la investigación y el desarrollo de la nanotecnología para la agricultura (Younis *et al.*, 2021). Sin embargo, dada la versatilidad de la nanotecnología, los efectos varían de acuerdo con las especies y el comportamiento y propiedades de los NM (Usman *et al.*, 2020). De esta manera, es necesaria una investigación detallada, principalmente si la aplicación va dirigida a sectores que involucren el

ambiente y la salud humana; además, hasta donde se sabe, no existen especificaciones concretas para el empleo y la comercialización de los NM relacionados con la agricultura (Kaphle *et al.*, 2018). Sin embargo, hay protocolos de evaluación de NM reportados por la OECD para otras áreas que marcan un precedente para la elaboración de futuros protocolos en la agricultura y el ambiente; el último reporte (2022) *Important issues on risk assessment of manufactured nanomaterials* destaca los aspectos más relevantes sobre los riesgos a la salud y el ambiente con respecto a la fabricación y el uso de los NM en la industria. Como cada caso de aplicación es específico, se dificulta establecer normas y regulación, como consecuencia de la falta de información que permita establecer marcos y criterios normativos, por ello, cuando se trata de una tecnología emergente, se plantea el “principio precautorio” como guía para las actividades que aún no tienen evidencia o certeza científica (Foladori *et al.*, 2013; Romero, 2020). Debido a los riesgos que los NM pueden presentar para la salud y el ambiente, no está totalmente esclarecido el principio precautorio que sería mantener detenida la liberación de NM hasta que su destino y efecto se entienda mejor. Por otro lado, hay falta de conocimiento y seguimiento normativo y, a pesar de ello, en algunos países buscan aplicar las leyes existentes para este tipo de materiales aun sabiendo que no hay manera de diferenciar entre las propiedades de un compuesto químico convencional con respecto a las propiedades únicas de cada NM (Romero, 2020). En el 2013, la OECD propuso a sus países miembro que aplicaran los marcos para regular compuestos químicos existentes para gestionar los riesgos asociados con los NM, debido al riesgo que esto presentaba; en el 2017, la recomendación se modificó para realizar adaptaciones, no obstante, el proceso ha sido largo (OECD, 2022).








Es necesario y urgente el desarrollo de una nanotecnología que esté respaldada por un marco normativo con elementos de bioseguridad. Algunos autores sugieren que el primer paso consiste en el intercambio de conocimientos e información que permitan enriquecer la gobernanza de los países para la implementación de marcos normativos (Lombi *et al.*, 2019). Sin embargo, a pesar de décadas de innovación y desarrollo de la nanotecnología aún existen países que no cuentan con normativa gubernamental. Por caso, países como Brasil, México y Argentina se posicionan en los primeros lugares de América Latina en el desarrollo de la nanotecnología y han buscado implementar normas ISO (Organización Internacional de Normalización) con el fin de normalizar procesos y sistemas de producción.¹ En el 2005, en México, se creó un comité de nanotecnología con el fin de elaborar normas mexicanas para las nanotecnologías mientras que, en el 2008, el comité ISO-TC 229 inició con la emisión de especificaciones técnicas involucrando la salud y la seguridad (Foladori, 2017). Incluso así, la regulación con respecto a la comercialización y aplicación de los NM es escasa, y se necesita más apoyo del sector gubernamental para esta-

¹ Puede consultarse el vol. 15, núm. 28 (2022) de la revista *Mundo Nano*, donde se aborda el tema de la nanogobernanza y la regulación de las NyN en América Latina. (Nota del editor).

blecer criterios sólidos. Se ha reportado que en países como Suecia, el apoyo a la regulación de NM aumentó debido a la percepción de riesgos mayores. Larsson *et al.*, (2019) llevaron a cabo un estudio, en el que realizaron entrevistas y reportaron que los organismos gubernamentales se inclinaban a favor de la regulación, puesto que percibían los riesgos que conlleva la aplicación de la nanotecnología. También, observaron que un factor relacionado con la aceptación, son las preocupaciones éticas del público no especializado. Van Dijk *et al.* (2017) afirman que la percepción de los riesgos y los beneficios están asociados con el área de aplicación de la nanotecnología, la incertidumbre es diferente cuando esta tecnología de vanguardia es aplicada a la electrónica, respecto a la aplicación del ramo alimenticio. Sin embargo, todo esto forma parte de una sociedad en desarrollo en la que siempre existen riesgos ambientales, sociales y políticos (Mitter y Hussey, 2019). Es necesario considerar que las políticas deben abordarse considerando la resolución basada en evidencia científica y la toma de decisiones de las cámaras legislativas de los gobiernos. Actualmente, quienes han establecido y han tomado la iniciativa en materia de legislación para la nanotecnología en el sector agrícola son la Unión Europea (UE) y Suiza. La UE cuenta con el Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de Sustancias Químicas (REACH, por sus siglas en inglés), uno de los sistemas más activos en materia de regulación de la nanotecnología en alimentos, agricultura y farmacia, que aborda el uso de los NM en productos fitosanitarios, aditivos y materiales aplicados a la industria de alimentos (Mitter y Hussey, 2019; Younis *et al.*, 2021). La REACH se ha apoyado de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA, por sus siglas en inglés) y la Comisión Europea (CE), ambas apuntando a garantizar niveles de seguridad con respecto a los productos basados en NM. Por su parte, Suiza cuenta con dos oficinas federales, la de Salud Pública y la de Medio Ambiente que participan en los planes de acción para la regulación de los NM en el sector agrícola. En general, se busca la existencia de una colaboración entre varios países del mundo para establecer claramente la legislación que debe incluirse e incorporar disposiciones específicas orientadas a la nanotecnología (Acharya y Pal, 2020). Por otro lado, la Agencia de Evaluación de la Seguridad de Estados Unidos como la *Food and Drug Administration* (FDA) y la EPA han informado sobre los riesgos relacionados con el uso de NM en alimentos (Bajpai *et al.*, 2018). China, Japón, Corea del Sur y la India son de los principales mercados de aditivos en alimentos controlados por la FDA, sin embargo, esta agencia no juzga correctamente los productos que contienen NM como benignos o nocivos, de hecho, dentro de sus directrices no consideran que todos los NM tengan un potencial de riesgo, sino que advierten caso por caso (Ashraf *et al.*, 2021; He *et al.*, 2019; Younis *et al.*, 2021). Este hecho forma parte de las principales diferencias con respecto a la regulación actual entre la UE y Estados Unidos, aun cuando se podría compartir un marco común a nivel mundial que permita hacer más eficiente la aplicación y comercialización de los NM, no existe esta colaboración y acuerdos entre los diferentes países. La CE, por ejemplo, establece la incorpo-

ración de etiquetas o declaraciones sobre la presencia de NP o NM en productos alimentarios y agrícolas, así como el nombre y tipo de material empleado (Ashraf *et al.*, 2021). Aun cuando existen países en los que se busca que las NP sean reguladas mediante leyes o actos en función de su aplicación (Mishra *et al.*, 2019) (figura 2), muchos de ellos van dirigidos al empaquetamiento de productos o aditivos de alimentos. Por otro lado, la UE, India y China sí cuentan con un marco regulatorio y normativo relevante en la aplicación de NM en sectores agroalimentarios (Younis *et al.*, 2021) (Tabla 2).

FIGURA 2. Países con medidas reguladoras en el ámbito de las nanopartículas.

	Estados Unidos. Programa de gestión de materiales a nanoescala, EPA, Estrategia de investigación sobre nanomateriales (2007), EPA, Control de los materiales a nanoescala según la Ley de Control de Sustancias Tóxicas, Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (NIOSH).
	Unión Europea. REACH (Registro, evaluación, autorización y restricción de sustancias químicas) E.C. 1272/2008a Legislación General de Alimentos (EC 178/2002), Regulación en aditivos de alimentos (EC 1333/2008), Regulación de materiales activos e inteligentes (EC 450/2009).
	India. Ley de seguridad y normas alimentarias, 2006.
	Corea. Ley de saneamiento de los alimentos y Ley Marco de Seguridad Alimentaria.
	Alemania. Código alemán de alimentos y piensos (LFGB).
	Japón. Ley de saneamiento de los alimentos (Ley n° 233).
	China. Ley de Seguridad Alimentaria de China, 2009.

Fuente: Elaboración de los autores.

TABLA 2. Países con marco regulatorio y normativo referente a las NP y los NM en el sector agroalimentario.

País	Autorización	Guía
UE	EC No. 1169/2011 y EC. No 258/97	Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea sobre la información alimentaria facilitada a los consumidores.
UE	EC No. 1107/2009	Guía de la EFSA para productos fitosanitarios e ingesta oral a través de los alimentos.
UE	EC No. 528/2012	Regulación relativa a la disponibilidad en el mercado y al uso de biocidas.
India	Ley de Seguridad Alimentaria y Normas, 2006	Autoridad de Normas de Seguridad Alimentaria de la India.
China	Ley de Seguridad Alimentaria de China, 2009	Ministerio de Agricultura Ministerio de Sanidad Instituto Nacional de Metrología.

Fuente: Elaboración de los autores.

Bajo esta perspectiva, existen retos que necesitan ser abordados si se desea una correcta y respaldada aplicación y comercialización de productos nanotecnológicos: considerar los riesgos, las incertidumbres en la legislación, conciencia y aceptación pública, producción con reproducibilidad (Younis *et al.*, 2021), análisis y evaluación. Aunque no todas las NP y NM son tóxicos, a nivel comercial, es relevante su evaluación y oportuna comunicación a los distribuidores o consumidores finales del producto acerca de los riesgos potenciales. En muchos países no regulan la nanotecnología agrícola, pero sí incluyen las NP en otros departamentos y los vinculan con y través de otros instrumentos: reglamentos, actas, notificaciones (Mishra *et al.*, 2019).

Actualmente, se propone un enfoque con colaboración transdisciplinar *One health*, respaldado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), la Organización Mundial de Sanidad Animal (OIE) y algunos gobiernos del mundo, en el que se busca integrar las diversas ciencias, incluidas las sociales y económicas junto con las humanidades en contexto legislativo, con el objetivo de facilitar el desarrollo de los marcos normativos adecuados para la nano-agrotecnología que aborden la seguridad en salud y ambiente (Lombi *et al.*, 2019). Además, se proponen opciones de política y acciones: tener un registro de las instituciones con experiencia que trabajen en la evaluación de la bioseguridad de NP, seguimiento y evaluación, reforzar la contribución económica a las aplicaciones de la nanotecnología en la agricultura y buscar estrategias para concientizar a la comunidad sobre el papel que juega la nanotecnología en términos de sostenibilidad y calidad de vida (Acharya y Pal, 2020). Estos podrían considerarse los principales puntos y estrategias que permitan la regulación de las aplicaciones de las NP y los NM en los sectores agroalimentario y ambiente debido a su débil enmarcación en cuanto a la evaluación de riesgo, seguridad y comercialización.

Conclusión

Con la información presentada, reciente y novedosa, se ha mostrado que se continúan investigando los efectos controversiales en el tema de la nanotecnología aplicada a la agricultura, pero sin duda alguna, en los próximos años, con la aparición y ayuda de nuevos instrumentos, nuevas metodologías y trabajo multidisciplinario, las nuevas investigaciones mostrarán evidencia de los efectos en la transferencia trófica y posiblemente efectos comprobables en humanos.

Consideramos la aplicación de nanomateriales a bajas concentraciones —independientemente de que se continúan esclareciendo los mecanismos y procesos involucrados entre la relación de los nanomateriales con el suelo, plantas, animales y humanos—, como posible, y, sumado a un esquema holístico incluyente de prácticas amigables con el ambiente, se podrá alcanzar una agricultura sustentable. Por otra parte, es altamente recomendable replan-

tear nuevos protocolos y normas, que desde las cámaras legislativas de los gobiernos y con el apoyo de investigadores y técnicos aborden temas específicos como el etiquetado riguroso de productos a base de materiales nanométricos. Por ejemplo, en México, en el seno del poder legislativo hay información muy limitada y poco se discute, por lo cual se dificulta proponer nuevas políticas públicas en temas de seguridad ambiental y alimentaria.

Se considera que con base en la información existente en temas de regulación de la aplicación de nanomateriales provenientes de los marcos regulatorios y normativos de la Unión Europea, EUA, China, Japón, India y Alemania, debemos divulgar la nanotecnología como precautoria, y, en consecuencia, el uso de estos NM deberá ir acompañado por una recomendación científica o técnica proveniente de las normas y leyes, para hacer conciencia y prevenir el que la nanotecnología pueda producir daños a los organismos, incluyendo los humanos.

Referencias

- Abbas, Q., Yousaf, B., Ullah, H., Ali, M. U., Ok, Y. S., Rinklebe, J. (2020). Environmental transformation and nano-toxicity of engineered nano-particles (ENPs) in aquatic and terrestrial organisms. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(23): 2523-2581. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1705721>.
- Abdel-Rahman, F. A., Monir, G. A., Hassan, M. S., Ahmed, Y., Refaat, M. H., Ismail, I. A., El-Garhy, H. A. (2021). Exogenously applied chitosan and chitosan nanoparticles improved apple fruit resistance to blue mold, upregulated defense-related genes expression, and maintained fruit quality. *Horticulturae*, 7(8): 224. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7080224>.
- Abdulsada, Z., Kibbee, R., Schwertfeger, D., Princz, J., DeRosa, M., Örmeci, B. (2021). Fate and removal of silver nanoparticles during sludge conditioning and their impact on soil health after simulated land application. *Water Research*, 206: 117757. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117757>.
- Acharya, A., Pal, P. K. (2020). Agriculture nanotechnology: Translating research outcome to field applications by influencing environmental sustainability. *Nano-Impact*, 19: 100232. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2020.100232>.
- Adrees, M., Khan, Z. S., Ali, S., Hafeez, M., Khalid, S., Ur Rehman, M. Z., Hussain, K., Chatha, S. A. S., Rizwan, M. (2020). Simultaneous mitigation of cadmium and drought stress in wheat by soil application of iron nanoparticles. *Chemosphere*, 238: 124681. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124681>.
- Agayeva, N. J., Rzayev, F. H., Gasimov, E. K., Mamedov, C. A., Ahmadov, I. S., Sadigova, N. A., Khusro, A., Al-Dhabi, N. A., Arasu, M. V. (2020). Exposure of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) to magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles in simplified food chain: Study on ultrastructural characterization. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27(12): 3258-3266. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.09.032>.
- Ahmed, B., Ameen, F., Rizvi, A., Ali, K., Sonbol, H., Zaidi, A., Khan, M. S., Musarrat, J. (2020). Destruction of cell topography, morphology, membrane, inhibition of

- respiration, biofilm formation, and bioactive molecule production by nanoparticles of Ag, ZnO, CuO, TiO₂, and Al₂O₃ toward beneficial soil bacteria. *ACS omega*, 5(14): 7861-7876. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b04084>.
- Ahmed, S. F., Mofijur, M., Rafa, N., Chowdhury, A. T., Chowdhury, S., Nahrin, M., Saiful Islam, A. B. M., Ong, H. C. (2022). Green approaches in synthesising nanomaterials for environmental nanobioremediation: Technological advancements, applications, benefits and challenges. *Environmental Research*, 204: 111967. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111967>.
- Alabdallah, Nadiyan M., Hassan S. Alzahrani. (2020). The potential mitigation effect of ZnO nanoparticles on [*Abelmoschus esculentus* L. Moench] metabolism under salt stress conditions. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27: 3132-3137. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.08.005>.
- Ali, S., Mehmood, A., Khan, N. (2021). Uptake, translocation, and consequences of nanomaterials on plant growth and stress adaptation. *Journal of Nanomaterials*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6677616>.
- Alsaedi, A., El-Ramady, H., Alshaal, T., El-Garawani, M., Elhawati, N., Al-Otaibi, A. (2018). Exogenous nanosilica improves germination and growth of cucumber by maintaining K⁺/Na⁺ ratio under elevated Na⁺ stress. *Plant physiology and biochemistry*, 125:164-171. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.02.006>.
- Alvandi, N., Assariha, S., Esfandiari, N., Jafari, R. (2021). Off-on sensor based on concentration-dependent multicolor fluorescent carbon dots for detecting pesticides. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 26: 100706. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2021.100706>.
- Amrane, A., Mohan, D., Nguyen, T. A., Assadi, A. A. A., Yasin, G. (eds.). (2020). Nanomaterials for soil remediation. *Micro and Nano Technologies Series*. Elsevier e-book: Elsevier.
- An, J., Hu, P., Li, F., Wu, H., Shen, Y., White, J. C., Tian, X., Li, Z., Giraldo, J. P. (2020). Emerging investigator series: molecular mechanisms of plant salinity stress tolerance improvement by seed priming with cerium oxide nanoparticles. *Environmental Science: Nano*, 7(8): 2214-2228. <https://doi.org/10.1039/D0EN00387E>.
- Aparna, A., Sreehari, H., Chandran, A., Anjali, K. P., Alex, A. M., Anuvinda, P., Gouthami, G. B., Pillai, N. P., Parvathy, N., Sadanandan, S., Appukuttan, S. (2021). Ligand-protected nanoclusters and their role in agriculture, sensing and allied applications. *Talanta*, 123:134. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2021.123134>.
- Arul, V., Edison, T. N. J. I., Lee, Y. R., Sethuraman, M. G. (2017). Biological and catalytic applications of green synthesized fluorescent N-doped carbon dots using *Hylocereus undatus*. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 168: 142-148. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2017.02.007>.
- Asgari, F., Majd, A., Jonoubi, P., Najafi, F. (2018). Effects of silicon nanoparticles on molecular, chemical, structural and ultrastructural characteristics of oat (*Avena sativa* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 127: 152-160. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.03.021>.
- Asghari, F., Jahanshahi, Z., Imani, M., Shams-Ghahfarokhi, M., Razzaghi-Abyaneh, M. (2016). Antifungal nanomaterials: synthesis, properties, and applications.

- En *Nanobiomaterials in antimicrobial therapy*. William Andrew Publishing, 343-383.
- Ashraf, S. A., Siddiqui, A. J., Abd Elmoneim, O. E., Khan, M. I., Patel, M., Alreshidi, M., Moin, A., Singh, R., Snoussi, M., Adnan, M. (2021). Innovations in nanoscience for the sustainable development of food and agriculture with implications on health and environment. *Science of the Total Environment*, 144990. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.144990>.
- Ayala, M. D. C. N. A., Castillo, F. D. H., Alcalá, E. I. L., Pérez, A. S. L., Canché, C. N. A., García, J. R. (2020). Efecto biológico de nanopartículas cargadas con ácido indolacético microbiano en parámetros morfométricos de tomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11: 507-517. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i3.1919>.
- Bajpai, V. K., Kamle, M., Shukla, S., Mahato, D. K., Chandra, P., Hwang, S. K., Kumar, P., Huh, Y. S., Han, Y. K. (2018). Prospects of using nanotechnology for food preservation, safety, and security. *Journal of Food and Drug Analysis*, 26 (4): 1201-14. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2018.06.011>.
- Baysal Asli, Saygın Hasan. (2018). Effect of zinc oxide nanoparticles on the trace element contents of soils. *Chemistry and Ecology*, 34: 713-726. <https://doi.org/10.1080/02757540.2018.1491556>.
- Bidi, H., Fallah, H., Niknejad, Y., Tari, D. B. (2021). Iron oxide nanoparticles alleviate arsenic phytotoxicity in rice by improving iron uptake, oxidative stress tolerance and diminishing arsenic accumulation. *Plant Physiology and Biochemistry*, 163: 348-357. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.04.020>.
- Bolade, O. P., A. B. Williams, N. U. Benson. (2020). Green synthesis of iron-based nanomaterials for environmental remediation: a review. *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.* 13: 100279: 1-26. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2019.100279>.
- Borišev, M., Borišev, I., Župunski, M., Arsenov, D., Pajević, S., Čurčić, Ž., Vasin, J., Djordjevic, A. (2016). Drought impact is alleviated in sugar beets (*Beta vulgaris* L.) by foliar application of fullerol nanoparticles. *PLoS One*, 11(11): e0166248. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166248>.
- Brar, K. K., Magdoui, S., Othmani, A., Ghanei, J., Narisetty, V., Sindhu, R., Binod, P., Pugazhendhi, A., Awasthi, M. K., Pandey, A. (2021). Green route for recycling of low-cost waste resources for the biosynthesis of nanoparticles (NPs) and nanomaterials (NMs)-A review. *Environmental Research*, 112202. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112202>.
- Brown, D. M., Wilson, M. R., MacNee, W., Stone, V., Donaldson, K. (2001). Size-dependent proinflammatory effects of ultrafine polystyrene particles: a role for surface area and oxidative stress in the enhanced activity of ultrafines. *Toxicology and applied pharmacology*, 175(3): 191-199. <https://doi.org/10.1006/taap.2001.9240>.
- Callaham, M. A., Stanturf J. A. (2021). Chapter 2 – Soil ecology and restoration science. En Stanturf, John A., Callaham, Mac A. (eds.), *Soils and landscape restoration*. Academic Press: 39-62. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813193-0.00002-3>.

- Chariou, P. L., Ortega-Rivera, O. A., Steinmetz, N. F. (2020). Nanocarriers for the delivery of medical, veterinary, and agricultural active ingredients. *ACS Nano*, 14(3): 2678-2701. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c00173>.
- Chaudhry, N., Dwivedi, S., Chaudhry, V., Singh, A., Saquib, Q., Azam, A., Musarrat, J. (2018). Bio-inspired nanomaterials in agriculture and food: Current status, foreseen applications and challenges. *Microbial pathogenesis*, 123: 196-200. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2018.07.013>.
- Chausali, N., Saxena, J., Prasad, R. (2021). Nanobiochar and biochar based nanocomposites: advances and applications. *Journal of Agriculture and Food Research*, 5: 100191. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100191>.
- Chen, Hao. (2018). Metal based nanoparticles in agricultural system: behavior, transport, and interaction with plants. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 30: 123-134. <https://doi.org/10.1080/09542299.2018.1520050>.
- Chen, W. H., J. R., Huang. (2020). Adsorption of organic including pharmaceutical and inorganic contaminants in water toward graphene-based materials. Chap. 3. En *Contaminants of emerging concern in water and wastewater*. Elsevier Inc., 93-113.
- Cota-Sánchez, G., Merlo-Sosa, L., Ávalos-Ramírez, A., Mendoza-González, N. (2015). 2. Assessment approaches, test methods, and monitoring strategies for nanomaterials. En *Nanomaterials in the environment*. American Society of Civil Engineers (ASCE), 27-56.
- Dimkpa, C. O., Singh, U., Bindraban, P. S., Elmer, W. H., Gardea-Torresdey, J. L., White, J. C. (2019). Zinc oxide nanoparticles alleviate drought-induced alterations in sorghum performance, nutrient acquisition, and grain fortification. *Science of the Total Environment*, 688: 926-934. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.392>.
- Do Espirito Santo Pereira, A., Caixeta Oliveira, H., Fernandes Fraceto, L., Santaella, C. (2021). Nanotechnology potential in seed priming for sustainable agriculture. *Nanomaterials*, 11(2): 267. <https://doi.org/10.3390/nano11020267>.
- Du, W., Yang, J., Peng, Q., Liang, X., Mao, H. (2019). Comparison study of zinc nanoparticles and zinc sulphate on wheat growth: From toxicity and zinc biofortification. *Chemosphere*, 227: 109-116.7 <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.168>.
- El-Gazzar, N., Ismail, A. M. (2020). The potential use of titanium, silver and selenium nanoparticles in controlling leaf blight of tomato caused by *Alternaria alternata*. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 27: 101708.
- El-Saadony, M. T., Saad, A. M., Najjar, A. A., Alzahrani, S. O., Alkhatib, F. M., Shafi, M. E., Selem, E., Desoky, E. M., Fouda, El-Tahan, A. M., S. E. E. Hassan, M. A. (2021). The use of biological selenium nanoparticles to suppress *Triticum aestivum* L. crown and root rot diseases induced by *Fusarium* species and improve yield under drought and heat stress. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(8): 4461-4471. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.04.043>.
- Farouk, S., Al-Amri, S. M. (2019). Exogenous zinc forms counteract NaCl-induced damage by regulating the antioxidant system, osmotic adjustment substances,

- and ions in canola (*Brassica napus* L. cv. Pactol) plants. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19(4): 887-899. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00087-y>.
- Feichtmeier, N. S., Walther, P., Leopold, K. (2015). Uptake, effects, and regeneration of barley plants exposed to gold nanoparticles. *Environmental science and pollution research*, 22(11): 8549-8558. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-4015-0>.
- Fenu, G., Francesca, M. M. (2020). DSS LANDS: a decision support system for agriculture in Sardinia. *HighTech and Innovation Journal*, 1:129-135. <https://doi.org/10.28991/HIJ-2020-01-03-05>.
- Foladori, G., Bejarano, F., Invernizzi, N. (2013). Nanotecnología: gestión y reglamentación de riesgos para la salud y medio ambiente en América Latina y el Caribe. *Trabalho, Educação e Saúde*, 11: 145-167, Brasil.
- Foladori, G. (2017). Occupational and environmental safety standards in nanotechnology: International Organization for Standardization, Latin America and Beyond. *Economic and Labour Relations Review*, 28(4): 538-54. <https://doi.org/10.1177/1035304617719802>.
- Gaviria-Arroyave, M. I., Cano, J. B., Peñuela, G. A. (2020). Nanomaterial-based fluorescent biosensors for monitoring environmental pollutants: a critical review. *Talanta Open*, 100006. <https://doi.org/10.1016/j.talo.2020.100006>.
- González-García, Y., Cárdenas-Álvarez, C., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A., Cabrera-de-la-Fuente, M., Sandoval-Rangel, A., Valdés-Reyna, J., Juárez-Maldonado, A. (2021a). Effect of three nanoparticles (Se, Si and Cu) on the bioactive compounds of bell pepper fruits under saline stress. *Plants*, 10(2): 217. <https://doi.org/10.3390/plants10020217>.
- González-García, Y., González-Moscoso, M., Hernández-Hernández, H., Méndez-López, A., Juárez-Maldonado, A. (2021b). Induction of stress tolerance in crops by applying nanomaterials. *Nanotechnology in plant growth promotion and protection: Recent Advances and Impacts*, 129-169. <https://doi.org/10.1002/9781119745884.ch8>.
- Griffiths, B. S., Römbke, J., Schmelz, R. M., Scheffczyk, A., Faber, J. H., Bloem, J., ... y Stone, D. (2016). Selecting cost effective and policy-relevant biological indicators for European monitoring of soil biodiversity and ecosystem function. *Ecological Indicators*, 69: 213-223. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.04.023>.
- Grün, A. L., Scheid, P., Hauröder, B., Emmerling, C., Manz, W. (2017). Assessment of the effect of silver nanoparticles on the relevant soil protozoan genus *Acanthamoeba*. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 180 (5): 602-613. <https://doi.org/10.1002/jpln.201700277>.
- Gupta, S. D., Agarwal, A., Pradhan, S. (2018). Phytostimulatory effect of silver nanoparticles (AgNPs) on rice seedling growth: An insight from antioxidative enzyme activities and gene expression patterns. *Ecotoxicology and environmental safety*, 161, 624-633. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.06.023>.
- Hayes, K. L., Mui, J., Song, B., Sani, E. S., Eisenman, S. W., Sheffield, J. B., Kim, B. (2020). Effects, uptake, and translocation of aluminum oxide nanoparticles in lettuce: A comparison study to phytotoxic aluminum ions. *Science of The Total Environment*, 719: 137393. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137393>.

- He, H., Sun, D. W., Wu, Z., Pu, H., Wei, Q. (2021). On-off-on fluorescent nanosensing: Materials, detection strategies and recent food applications. *Trends in Food Science & Technology*, 119: 243-256. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.11.029>.
- He, X., Deng, H., Hwang, H. M. (2019). The current application of nanotechnology in food and agriculture. *Journal of Food and Drug Analysis*, 27(1): 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2018.12.002>.
- He, Y., Xiao, S., Dong, T., Nie, P. (2019). Gold nanoparticles with different particle sizes for the quantitative determination of chlorpyrifos residues in soil by SERS. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(11): 2817. <https://doi.org/10.3390/ijms20112817>.
- Heikal, Y. M., Abdel-Aziz, H. M. (2021). Toxicology and safety aspects of nanosensor on environment, food, and agriculture. En *Nanosensors for Environment, Food and Agriculture*, 1: 139-156. Springer.
- Hernández-Hernández, H., Quiterio-Gutiérrez, T., Cadenas-Pliego, G., Ortega-Ortiz, H., Hernández-Fuentes, A. D., Cabrera de la Fuente, M., Valdés-Reyna, J., Juárez-Maldonado, A. (2019). Impact of selenium and copper nanoparticles on yield, antioxidant system, and fruit quality of tomato plants. *Plants*, 8(10): 355. <https://doi.org/10.3390/plants8100355>.
- Hernández-Tenorio, F., Orozco-Sánchez, F. (2020). Nanoformulaciones de bioinsecticidas botánicos para el control de plagas agrícolas. *Revista de la Facultad de Ciencias* 9: 72-91. <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v9n1.81401>.
- Hong, C., Ye, S., Dai, C., Wu, C., Chen, L., Huang, Z. (2020). Sensitive and on-site detection of glyphosate based on papain-stabilized fluorescent gold nanoclusters. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 412(29): 8177-8184. <https://doi.org/10.1007/s00216-020-02952-7>.
- Hou, J., Wang, L., Wang, C., Zhang, S., Liu, H., Li, S., Wang, X. (2019). Toxicity and mechanisms of action of titanium dioxide nanoparticles in living organisms. *Journal of Environmental Sciences*, 75: 40-53. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.06.010>.
- Hui, C., Zhang, Y., Ni, X., Cheng, Q., Zhao, Y., Zhao, Y., Du, L., Jiang, H. (2021). Interactions of iron-based nanoparticles with soil dissolved organic matter: adsorption, aging, and effects on hexavalent chromium removal. *Journal of Hazardous Materials*, 406: 124650. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124650>.
- Husein, D. Z., Hassanien, R., Al-Hakkani, M. F. (2019). Green-synthesized copper nano-adsorbent for the removal of pharmaceutical pollutants from real wastewater samples. *Heliyon*, 5(8): e02339. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02339>.
- Hussain, A., Ali, S., Rizwan, M., ur Rehman, M. Z., Javed, M. R., Imran, M., Chatha, S. A. S Nazir, R. (2018). Zinc oxide nanoparticles alter the wheat physiological response and reduce the cadmium uptake by plants. *Environmental Pollution*, 242: 1518-1526 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.036>.
- Hussain, B., Lin, Q., Hamid, Y., Sanaullah, M., Di, L., Khan, M. B., He, Z., Yang, X. (2020). Foliage application of selenium and silicon nanoparticles alleviates Cd and Pb toxicity in rice (*Oryza sativa* L.). *Science of the Total Environment*, 712: 136497. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136497>.

- Hussain, M., Raja, N. I., Iqbal, M., Ejaz, M., Aslam, S. (2019). Green synthesis and evaluation of silver nanoparticles for antimicrobial and biochemical profiling in Kinnow (*Citrus reticulata* L.) to enhance fruit quality and productivity under biotic stress. *IET nanobiotechnology*, 13(3): 250-256. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2018.5049>.
- Ibrahim, E., Fouad, H., Zhang, M., Zhang, Y., Qiu, W., Yan, C., ... y Chen, J. (2019). Biosynthesis of silver nanoparticles using endophytic bacteria and their role in inhibition of rice pathogenic bacteria and plant growth promotion. *RSC advances*, 9(50): 29293-29299. <https://doi.org/10.1039/C9RA04246F>.
- Illés, E., Tombácz, E. (2006). The effect of humic acid adsorption on pH-dependent surface charging and aggregation of magnetite nanoparticles. *Journal of Colloid and Interface Science*, 295: 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.08.003>.
- Ioannou, A., Gohari, G., Papaphilippou, P., Panahirad, S., Akbari, A., Dadpour, M. R., ... y Fotopoulos, V. (2020). Advanced nanomaterials in agriculture under a changing climate: the way to the future? *Environmental and Experimental Botany*, 176: 104048. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104048>.
- Jahani, M., Khavari-Nejad, R. A., Mahmoodzadeh, H., Saadatmand, S. (2020). Effects of cobalt oxide nanoparticles (Co₃O₄ NPs) on ion leakage, total phenol, antioxidant enzymes activities and cobalt accumulation in *Brassica napus* L. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 48(3): 1260-1275. <https://doi.org/10.15835/nbha48311766>.
- Jeevanandam, J., Barhoum, A., Chan, Y. S., Dufresne, A., Danquah, M. K. (2018). Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 9(1): 1050-1074. <https://doi.org/10.3762/bjnano.9.98>.
- Jiang, Y., Yu, L., Sun, H., Yin, X., Wang, C., Mathews, S., Wang, N. (2017). Transport of natural soil nanoparticles in saturated porous media: effects of pH and ionic strength. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 29(1): 186-196. <https://doi.org/10.1080/09542299.2017.1403293>.
- Joshi, A., Kaur, S., Dharamvir, K., Nayyar, H., Verma, G. (2018). Multi-walled carbon nanotubes applied through seed-priming influence early germination, root hair growth and yield of bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(8): 3148-3160. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8818>.
- Juárez-Maldonado, A. (2021). Impact of nanomaterials on plants: what other implications do they have? *Biocell*, 46(3): 651-654. <https://doi.org/10.32604/bi-cell.2022.017350>.
- Kamran, M., Ali, H., Saeed, M. F., Bakhat, H. F., Hassan, Z., Tahir, M., ... y Shah, G. M. (2020). Unraveling the toxic effects of iron oxide nanoparticles on nitrogen cycling through manure-soil-plant continuum. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 205: 111099. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111099>.
- Kaphle, A., Navya, P. N., Umapathi, A., Daima, H. K. (2018). Nanomaterials for agriculture, food and environment: applications, toxicity and regulation. *Environmental chemistry letters*, 16(1): 43-58. <https://doi.org/10.1007/s10311-017-0662-y>.
- Kaphle, A., Navya, P. N., Umapathi, A., Chopra, M., Daima, H. K. (2017). Nanomate-

- rial impact, toxicity and regulation in agriculture, food and environment. En *Nanoscience in food and agriculture 5*. Springer, Cham., 205-242. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58496-6_8.
- Kashyap, P. L., Kumar, S., Jasrotia, P., Singh, D. P., Singh, G. P. (2019). Nanosensors for plant disease diagnosis: current understanding and future perspectives. En Pudake, R., Chauhan, N., Kole, C. (eds.), *Nanoscience for sustainable agriculture*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97852-9_9.
- Kasote, D. M., Lee, J. H., Jayaprakasha, G. K., Patil, B. S. (2019). Seed priming with iron oxide nanoparticles modulate antioxidant potential and defense-linked hormones in watermelon seedlings. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(5): 5142-5151. PubAg U.S. Department of Agriculture.
- Khan, I., Raza, M. A., Awan, S. A., Shah, G. A., Rizwan, M., Ali, B., Tariq, R., Hassan, M. J., Alyemeni, M. N., Brestic, M., Zhang, X., Ali, S., Huang, L. (2020). Amelioration of salt induced toxicity in pearl millet by seed priming with silver nanoparticles (AgNPs): the oxidative damage, antioxidant enzymes and ions uptake are major determinants of salt tolerant capacity. *Plant Physiology and Biochemistry*, 156: 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.09.018>.
- Khan, M. N., Mobin, M., Abbas, Z. K., AlMutairi, K. A., Siddiqui, Z. H. (2017). Role of nanomaterials in plants under challenging environments. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110: 194-209. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.05.038>.
- Kim, S., Kim, J., Lee, I. (2011). Effects of Zn and ZnO nanoparticles and Zn²⁺ on soil enzyme activity and bioaccumulation of Zn in *Cucumis sativus*. *Chemistry and Ecology*, 27: 49-55. <https://doi.org/10.1080/02757540.2010.529074>.
- Kőrösi, L., Pertics, B., Schneider, G., Bognár, B., Kovács, J., Meynen, V., Scarpellini, A., Pasquale, L., Prato, M. (2020). Photocatalytic inactivation of plant pathogenic bacteria using TiO₂ nanoparticles prepared hydrothermally. *Nanomaterials*, 10(9): 1730. <https://doi.org/10.3390/nano10091730>.
- Kraas, M., Schlich, K., Knopf, B., Wege, F., Kági, R., Terytze, K., Hund-Rinke, K. (2017). Long-term effects of sulfidized silver nanoparticles in sewage sludge on soil microflora. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 36: 3305-3313. <https://doi.org/10.1002/etc.3904>.
- Kumaraswamy, R. V., Kumari, S., Choudhary, R. C., Pal, A., Raliya, R., Biswas, P., Saharan, V. (2018). Engineered chitosan based nanomaterials: bioactivities, mechanisms and perspectives in plant protection and growth. *International Journal of Biological Macromolecules*, 113: 494-506. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.02.130>.
- Larsson, S., Jansson, M., Boholm, Å. (2019). Expert stakeholders' perception of nanotechnology: risk, benefit, knowledge, and regulation. *Journal of Nanoparticle Research*, 21(3): 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11051-019-4498-1>.
- Larue, C., Baratange, C., Vantelon, D., Khodja, H., Surlé S., Elger, A., Carrière M. (2018). Influence of soil type on TiO₂ nanoparticle fate in an agro-ecosystem. *Science of the Total Environment*, 630: 609-617. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.264>.
- Li, B., Chen, Y., Liang, W. Z., Mu, L., Bridges, W. C., Jacobson, A. R., Darnault, C. J.

- (2017). Influence of cerium oxide nanoparticles on the soil enzyme activities in a soil-grass microcosm system. *Geoderma*, 299:54-62. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.03.027>.
- Li, Y., Zhu, N., Liang, X., Bai, X., Zheng, L., Zhao, J., Li, Y., Zhang, Z., Gao, Y. (2020). Silica nanoparticles alleviate mercury toxicity via immobilization and inactivation of Hg (ii) in soybean (*Glycine max*). *Environmental Science: Nano*, 7(6): 1807-1817. <https://doi.org/10.1039/D0EN00091D>.
- Lian, J., Zhao, L., Wu, J., Xiong, H., Bao, Y., Zeb, A., Tang, J., Liu, W. (2020). Foliar spray of TiO₂ nanoparticles prevails over root application in reducing Cd accumulation and mitigating Cd-induced phytotoxicity in maize (*Zea mays* L.). *Chemosphere*, 239: 124794. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124794>.
- Lira-Saldívar, R. H., Méndez Argüello, B., De los Santos Villarreal, G., Vera Reyes, I. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta Universitaria*, 28(2): 9-24, México. <https://doi.org/10.15174/au.2018.1575>.
- Lira-Saldívar, R. H., Méndez Argüello, B., De los Santos Villarreal, G., Vera Reyes, I. (2018). Agronotecnología: una nueva herramienta para la agricultura moderna. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*, 50(2): 395-411.
- Lombi, E., Donner, E., Dusinska, M., Wickson, F. (2019). A one health approach to managing the applications and implications of nanotechnologies in agriculture. *Nature Nanotechnology*, 14(6): 523-31. <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0460-8>.
- Lu, Y., Lan, Q., Zhang, C., Liu, B., Wang, X., Xu, X., Liang, X. (2021). Trace-level sensing of phosphate for natural soils by a nano-screen-printed electrode. *Environmental Science & Technology*, 55(19): 13093-13102. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05363>.
- Macůrková, A., Maryška L., Jindřichová, B., Drobníková, T., Vrchotová, B., Pospíchalová, R., Záruba, K., Hubáček, T., Siegel, J., Burketová, L., Lovecká, P., Valentová, O. (2021). Effect of round-shaped silver nanoparticles on the genetic and functional diversity of soil microbial community in soil and “soil-plant” systems. *Applied Soil Ecology*, 168: 104165. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104165>.
- Mankad, M., Patil, G., Patel, D., Patel, P., Patel, A. (2020). Comparative studies of sunlight mediated green synthesis of silver nanoparticles from *Azadirachta indica* leaf extract and its antibacterial effect on *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(1): 2865-2872. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2018.07.016>.
- Memari-Tabrizi, E. F., Yousefpour-Dokhanieh, A., Babashpour-Asl, M. (2021). Foliar-applied silicon nanoparticles mitigate cadmium stress through physiochemical changes to improve growth, antioxidant capacity, and essential oil profile of summer savory (*Satureja hortensis* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 165: 71-79. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.04.040>.
- Mishra, M., Dashora, K., Srivastava, A., Fasake, V. D., Nag, R. H. (2019). Prospects, challenges and need for regulation of nanotechnology with special reference to India. *Ecotoxicology and environmental safety*, 171: 677-682. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.12.085>.

- Mitter, N., Hussey, K. (2019). Moving policy and regulation forward for nanotechnology applications in agriculture. *Nature nanotechnology*, 14(6): 508-510. <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0464-4>.
- Mosa, K. A., Ismail, A., Helmy, M. (2017). *Plant stress tolerance: an integrated omics approach*. Cham, Switzerland: Springer.
- Munir, T., Rizwan, M., Kashif, M., Shahzad, A., Ali, S., Amin, N., ... e Imran, M. (2018). Effect of zinc oxide nanoparticles on the growth and Zn uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) by seed priming method. *Digest Journal of Nano-materials & Biostructures* (DJNB): 13(1).
- Nandhini, M., Rajini, S. B., Udayashankar, A. C., Niranjana, S. R., Lund, O. S., Shetty, H. S., Prakash, H. S. (2019). Biofabricated zinc oxide nanoparticles as an eco-friendly alternative for growth promotion and management of downy mildew of pearl millet. *Crop Protection*, 121: 103-112. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.03.015>.
- Nasrollahzadeh, M., Sajjadi, M., Irvani, S., Varma, R. S. (2021). Green-synthesized nanocatalysts and nanomaterials for water treatment: Current challenges and future perspectives. *Journal of Hazardous Materials*, 401: 123401. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123401>.
- Nazaralian, S., Majd, A., Irian, S., Najafi, F., Ghahremaninejad, F., Landberg, T., Greger, M. (2017). Comparison of silicon nanoparticles and silicate treatments in fenu-greek. *Plant Physiology and Biochemistry*, 115: 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.03.009>.
- Nishu, S. D., Park, S., Ji, Y., Han, I., Key, J., Lee, T. K. (2020). The effect of engineered PLGA nanoparticles on nitrifying bacteria in the soil environment. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 84: 297-304. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.01.011>.
- Nithya, K., A. Sathish, P. S. Kumar, T. Ramachandran. (2018). Fast kinetics and high adsorption capacity of green extract capped superparamagnetic iron oxide nanoparticles for the adsorption of Ni(II) ions. *J. Ind. Eng. Chem.* 59: 230-241. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1226086X17305683>.
- Nomngongo, P. N., Ngila, J. C., Musyoka, S. M., Msagati, T. A., Moodley, B. (2013). A solid phase extraction procedure based on electrospun cellulose-g-oxolane-2, 5-dione nanofibers for trace determination of Cd, Cu, Fe, Pb and Zn in gasoline samples by ICP-OES. *Analytical Methods*, 5(12): 3000-3008. <https://doi.org/10.1039/C3AY26543A>.
- Nuruzzaman, M. D., Rahman, M. M., Liu, Y., Naidu, R. (2016). Nanoencapsulation, nano-guard for pesticides: a new window for safe application. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(7): 1447-1483. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b05214>.
- OECD. (2022). *Recommendation of the Council on OECD Legal Instruments the Safety Testing and Assessment of Manufactured Nanomaterials*. <https://www.oecd.org/chemicalsafety/oecd-countries-address-the-safety-of-manufactured-nanomaterials.htm>.
- Peng, C., Tong, H., Shen, C., Sun, L., Yuan, P., He, M., Shi, J. (2020). Bioavailability and translocation of metal oxide nanoparticles in the soil-rice plant system.

- Science of The Total Environment*, 713: 136662. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136662>.
- Pérez-Hernández, H., Fernández-Luqueño, F., Huerta-Lwanga, E., Mendoza-Vega, J., Álvarez-Solís J. D. (2020). Effect of engineered nanoparticles on soil biota: Do they improve the soil quality and crop production or jeopardize them? *Land Degradation & Development*, 31(16): 2213-2230. <https://doi.org/10.1002/ldr.3595>.
- Pérez-Hernández, H., Pérez-Moreno, A., Sarabia-Castillo, C. R., García-Mayagoitia, S., Medina-Pérez, G., López-Valdez, F., Campos-Montiel, R. G., Jayanta-Kumar, P., Fernández-Luqueño, F. (2021). Ecological drawbacks of nanomaterials produced on an industrial scale: collateral effect on human and environmental health. *Water, Air, and Soil Pollution*, 232(10): 435. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05370-2>.
- Pérez-Labrada, F., López-Vargas, E. R., Ortega-Ortiz, H., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A., Juárez-Maldonado, A. (2019). Responses of tomato plants under saline stress to foliar application of copper nanoparticles. *Plants*, 8(6): 151. <https://doi.org/10.3390/plants8060151>.
- Peyrot, C., Wilkinson, K. J., Desrosiers, M., Sauvé, S. (2014). Effects of silver nanoparticles on soil enzyme activities with and without added organic matter. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 33(1): 115-125. <https://doi.org/10.1002/etc.2398>.
- Qian, Y., Yao, J., Russel, M., Wang, X., Sandy, E. H. (2016). Exploring medium-term impact of oxide nanoparticles on soil microbial activity by isothermal microcalorimetry and urease assay. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 35(2): 395-403. <https://doi.org/10.1002/ep.12245>.
- Qu, H., Ma, C., Xing, W., Xue, L., Liu, H., White, J. C., ... y Xing, B. (2022). Effects of copper oxide nanoparticles on *Salix* growth, soil enzyme activity and microbial community composition in a wetland mesocosm. *Journal of Hazardous Materials*, 424: 127676. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127676>.
- Quiterio-Gutiérrez, T., Ortega-Ortiz, H., Cadenas-Pliego, G., Hernández-Fuentes, A. D., Sandoval-Rangel, A., Benavides-Mendoza, A., Cabrera-De la Fuente, M., Juárez-Maldonado, A. (2019). The application of selenium and copper nanoparticles modifies the biochemical responses of tomato plants under stress by *Alternaria solani*. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(8): 1950. <https://doi.org/10.3390/ijms20081950>.
- Raj, S. N., Anooj, E. S., Rajendran, K., Vallinayagam, S. (2021). A comprehensive review on regulatory invention of nano pesticides in agricultural nano formulation and food system. *Journal of Molecular Structure*, 130517. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.130517>.
- Rajput, V., Minkina, T., Mazarji, M., Shende, S., Sushkova, S., Mandzhieva, S., Burachevs-kaya, M., Chaplygin, V., Singh, A., Jatav, H. (2020). Accumulation of nanoparticles in the soil-plant systems and their effects on human health. *Annals of Agricultural Sciences*, 65(2): 137-143. <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2020.08.001>.
- Raliya, R., Franke, C., Chavalmane, S., Nair, R., Reed, N., Biswas, P. (2016). Quantita-

- tive understanding of nanoparticle uptake in watermelon plants. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1288. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01288>.
- Rawtani, D., Rao, P. K., Hussain, C. M. (2020). Recent advances in analytical, bioanalytical and miscellaneous applications of green nanomaterial. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 116109. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.116109>.
- Rico, C. M., Peralta-Videa, J. R., Gardea-Torresdey, J. L. (2015). Chemistry, biochemistry of nanoparticles, and their role in antioxidant defense system in plants. *En Nanotechnology and plant sciences*. Cham, Suwitzerland: Springer, 1-17.
- Rizwan, M., Ali, S., Ali, B., Adrees, M., Arshad, M., Hussain, A. *et al.* (2019). Zinc and iron oxide nanoparticles improved the plant growth and reduced the oxidative stress and cadmium concentration in wheat. *Chemosphere*, 214: 269-277. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.120>.
- Romero-Freire, A., Lofts, S., Martín Peinado, F. J., Van Gestel, C. A. (2017). Effects of aging and soil properties on zinc oxide nanoparticle availability and its ecotoxicological effects to the earthworm *Eisenia andrei*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 36(1): 137-146. <https://doi.org/10.1002/etc.3512>.
- Romero, I. C. M. (2020). Principios para la supervisión y regulación de nanomateriales y nanotecnología. *Literatura gris*, 2020: 1-24. Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. <https://doi.org/10.18359/litgris.5074>.
- Salama, D. M., Osman, S. A., Abd El-Aziz, M. E., Abd Elwahed, M. S., Shaaban, E. A. (2019). Effect of zinc oxide nanoparticles on the growth, genomic DNA, production and the quality of common dry bean (*Phaseolus vulgaris*). *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 18: 101083. <https://doi.org/10.1016/j.cbab.2019.101083>.
- Saleem, H., Zaidi, S. J. (2020). Recent developments in the application of nanomaterials in agroecosystems. *Nanomaterials*, 10(12): 2411. <https://doi.org/10.3390/nano10122411>.
- Saleh, T. A. (2020). Nanomaterials: Classification, properties, and environmental toxicities. *Environmental Technology & Innovation*, 101067. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101067>.
- Schimpf, M. G., Milesi, M. M., Zanardi, M. V., Varayoud, J. (2021). Disruption of developmental programming with long-term consequences after exposure to a glyphosate-based herbicide in a rat model. *Food and Chemical Toxicology*, 112695. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.112695>.
- Shafiq, F., Iqbal, M., Ali, M., Ashraf, M. A. (2019). Seed pre-treatment with polyhydroxy fullerene nanoparticles confer salt tolerance in wheat through upregulation of H₂O₂ neutralizing enzymes and phosphorus uptake. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19(4): 734-742.
- Shah, T., Latif, S., Saeed, F., Ali, I., Ullah, S., Alsahli, A. A., ... y Ahmad, P. (2021). Seed priming with titanium dioxide nanoparticles enhances seed vigor, leaf water status, and antioxidant enzyme activities in maize (*Zea mays* L.) under salinity stress. *Journal of King Saud University-Science*, 33(1): 101207. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.10.004>.
- Sharma, P., Pandey, V., Sharma, M. M. M., Patra, A., Singh, B., Mehta, S., Husen, A. (2021). A review on biosensors and nanosensors application in agroecosys-

- tems. *Nanoscale Research Letters*, 16(1): 1-24. <https://doi.org/10.1186/s11671-021-03593-0>.
- Simonin, M., Colman, B. P., Anderson, S. M., King, R. S., Ruis, M. T., Avellan, A., Bergemann, C. M., Perrotta, B. G., Geitner, N. K., Ho, Mengchi, De la Barrera, B., Unrine, J. M., Lowry, G. V., Richardson, C. J., Wiesner, M. R., Bernhardt, E. S. (2018). Engineered nanoparticles interact with nutrients to intensify eutrophication in a wetland ecosystem experiment. *Ecological Applications*, 28: 1435-1449. <https://doi.org/10.1002/eap.1742>.
- Sotoodehnia-Korani, S., Iranbakhsh, A., Ebadi, M., Majd, A., Ardebili, Z. O. (2020). Selenium nanoparticles induced variations in growth, morphology, anatomy, biochemistry, gene expression, and epigenetic DNA methylation in *Capsicum annuum*; an *in vitro* study. *Environmental Pollution*, 265: 114727. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114727>.
- Srivastava, A. K., Dev, A., Karmakar, S. (2018). Nanosensors and nanobiosensors in food and agriculture. *Environmental Chemistry Letters*, 16(1): 161-182. <https://doi.org/10.1007/s10311-017-0674-7>.
- Stevens, A. W. (2018). Review: The economics of soil health. *Food Policy*, 89: 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2018.08.005>.
- Sun, L., Xue, Y., Peng, C., Xu, C., Shi, J. (2020). Influence of sulfur fertilization on CuO nanoparticles migration and transformation in soil pore water from the rice (*Oryza sativa* L.) rhizosphere. *Environmental Pollution*, 257: 113608. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113608>.
- Sundaria, N., Singh, M., Upreti, P., Chauhan, R. P., Jaiswal, J. P., Kumar, A. (2019). Seed priming with iron oxide nanoparticles triggers iron acquisition and biofortification in wheat (*Triticum aestivum* L.) grains. *Journal of Plant Growth Regulation*, 38(1): 122-131. <https://doi.org/10.1007/s00344-018-9818-7>.
- Surendranath, A., Mohanan, P. V. (2021). Impact of nanoparticles in balancing the ecosystem. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 11(3): 10461-10481. <https://doi.org/10.33263/BRIAC113.1046110481>.
- Tarannum, N., Divya, Y. K. Gautam. (2019). Facile green synthesis and applications of silver nanoparticles: A state-of-the-art review. *RSC Advances*, 60.
- Temizel-Sekeryan, S., Hicks, A. L. (2020). Global environmental impacts of silver nanoparticle production methods supported by life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 156: 104676. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104676>.
- Thangadurai, D., Shettar, A. K., Sangeetha, J., Adetunji, C. O., Islam, S., Al-Tawaha, A. R. M. S. (2021). Nanosensors for detection and evaluation of organic compounds in soil. En *Nanomaterials for soil remediation*. Elsevier, 205-219.
- Tripathi, D. K., Singh, V. P., Prasad, S. M., Chauhan, D. K., Dubey, N. K. (2015). Silicon nanoparticles (SiNp) alleviate chromium (VI) phytotoxicity in *Pisum sativum* (L.) seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 96: 189-198. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.07.026>.
- Tripathi, D. K., Tripathi, A., Singh, S., Singh, Y., Vishwakarma, K., Yadav, G., ... y Chauhan, D. K. (2017). Uptake, accumulation and toxicity of silver nanopar-

- title in autotrophic plants, and heterotrophic microbes: a concentric review. *Frontiers in Microbiology*, 8: 7. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00007>.
- Tümay, S. O., Şenocak, A., Sarı, E., Şanko, V., Durmuş, M., Demirbas, E. (2021). A new perspective for electrochemical determination of parathion and chlorantraniliprole pesticides via carbon nanotube-based thiophene-ferrocene appended hybrid nanosensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 130344. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130344>.
- Umapathi, R., Sonwal, S., Lee, M. J., Rani, G. M., Lee, E. S., Jeon, T. J., Huh, Y. S. (2021). Colorimetric based on-site sensing strategies for the rapid detection of pesticides in agricultural foods: New horizons, perspectives, and challenges. *Coordination Chemistry Reviews*, 446, 214061. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.214061>.
- Ur Rahim, H., Qaswar, M., Uddin, M., Giannini, C., Herrera, M. L., Rea, G. (2021). Nano-enable materials promoting sustainability and resilience in modern agriculture. *Nanomaterials*, 11(8): 2068. <https://doi.org/10.3390/nano11082068>.
- Usman, M., Farooq, M., Wakeel, A., Nawaz, A., Cheema, S. A., ur Rehman, H., Ashraf, I., Sanallah, 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>.
- Van Dijk, H., Fischer, A. R., Marvin, H. J., Van Trijp, H. C. (2017). Determinants of stakeholders' attitudes towards a new technology: nanotechnology applications for food, water, energy and medicine. *Journal of Risk Research*, 20(2): 277-298. <https://doi.org/10.1080/13669877.2015.1057198>.
- Verma, S., Nizam, S., Verma, P. K. (2013). Biotic and abiotic stress signaling in plants. En Sarwat Mryam, Ahmad Altaf y Abdin MZ (eds.), *Stress signaling in plants: genomics and proteomics perspectives*, 1: 25-49.
- Wang, D., Jaisi, D. P., Yan, J., Jin, Y., Zhou, D. (2015). Transport and retention of polyvinylpyrrolidone-coated silver nanoparticles in natural soils. *Vadose Zone Journal*, 14(7). <https://doi.org/10.2136/vzj2015.01.0007>.
- Wang, M., Gao, B., Tang, D. (2016). Review of key factors controlling engineered nanoparticle transport in porous media. *Journal of Hazardous Materials*, 318: 233-246. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.06.065>.
- Wei, W. J., Li, L., Gao, Y. P., Wang, Q., Zhou, Y. Y., Liu, X., Yang, Y. (2021). Enzyme digestion combined with SP-ICP-MS analysis to characterize the bioaccumulation of gold nanoparticles by mustard and lettuce plants. *Science of the Total Environment*, 777: 146038. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146038>.
- Wu, H., Nißler, R., Morris, V., Herrmann, N., Hu, P., Jeon, S. J., Kruss, S., Giraldo, J. P. (2020). Monitoring plant health with near-infrared fluorescent H₂O₂ nanosensors. *Nano letters*, 20(4): 2432-2442. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.9b05159>.
- Xiaohong, L. I. U., Juan, W. A. N. G., Lingli, W. U., Zhang, L., Youbin, S. I. (2021). Impacts of silver nanoparticles on enzymatic activities, nitrifying bacteria, and nitrogen transformation in soil amended with ammonium and nitrate. *Pedosphere*, 31(6): 934-943. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(21\)60036-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60036-X).

- Xin, X., Zhao, F., Zhao, H., Goodrich, S. L., Hill, M. R., Sumerlin, B. S., Stoffella, P. J., Wright, A. L., He, Z. (2020). Comparative assessment of polymeric and other nanoparticles impacts on soil microbial and biochemical properties. *Geoderma*, 367: 114278. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114278>.
- Xing, Y., Yi, R., Yang, H., Xu, Q., Huang, R., Tang, J., ... y Yu, J. (2021). Antifungal effect of chitosan/nano-TiO₂ composite coatings against colletotrichum gloeosporioides, *Cladosporium oxysporum* and *Penicillium steckii*. *Molecules*, 26(15): 4401. <https://doi.org/10.3390/molecules26154401>.
- Yang, W., Cheng, P., Adams, C. A., Zhang, S., Sun, Y., Yu, H., Wang, F. (2021). Effects of microplastics on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in a soil spiked with ZnO nanoparticles. *Soil Biology and Biochemistry*, 155: 108179. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108179>.
- Younis, S. A., Ki, H. K., Sabry, M. S., Vasileios, A., Yiu, F. T, Jörg, R., Akash, D., Brown, R. J. C. (2021). Advancements of nanotechnologies in crop promotion and soil fertility: Benefits, life cycle assessment, and legislation policies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111686>.
- Zahedi, S. M., Moharrami, F., Sarikhani, S., Padervand, M. (2020). Selenium and silica nanostructure-based recovery of strawberry plants subjected to drought stress. *Scientific reports*, 10(1): 1-18. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74273-9>.
- Zhai, Y., Chen, L., Liu, G., Song, L., Arenas-Lago, D., Kong, L., Peijnenburg, W., Vijver, M. G. (2021). Compositional and functional responses of bacterial community to titanium dioxide nanoparticles varied with soil heterogeneity and exposure duration. *Science of the Total Environment*, 773: 144895. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144895>.
- Zhai, Y., Hunting, E. R., Liu, G., Baas, E., Peijnenburg, W. J., Vijver, M. G. (2019). Compositional alterations in soil bacterial communities exposed to TiO₂ nanoparticles are not reflected in functional impacts. *Environmental research*, 178: 108713. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108713>.
- Zhang, H., Yue, M., Zheng, X., Xie, C., Zhou, H., Li, L. (2017). Physiological effects of single-and multi-walled carbon nanotubes on rice seedlings. *IEEE Transactions on Nanobioscience*, 16(7): 563-570. <https://doi.org/10.1109/TNB.2017.2715359>.
- Zhao, J., Tang, J., Dang, T. (2022). Influence of extracellular polymeric substances on the heteroaggregation between CeO₂ nanoparticles and soil mineral particles. *Science of The Total Environment*, 806: 150358. <https://doi.org/10.1016/j.s.citotenv.2021.150358>.
- Zhao, S., Su, X., Wang, Y., Yang, X., Bi, M., He, Q., Chen, Y. (2020). Copper oxide nanoparticles inhibited denitrifying enzymes and electron transport system activities to influence soil denitrification and N₂O emission. *Chemosphere*, 245: 125394. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125394>.
- Zhao, L., Lu, L., Wang, A., Zhang, H., Huang, M., Wu, H., ... y Ji, R. (2020). Nanobiotechnology in agriculture: use of nanomaterials to promote plant growth and stress tolerance. *Journal of agricultural and food chemistry*, 68(7): 1935-1947. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06615>.

- Zhou, D. M., Jin, S. Y., Wang, Y. J., Wang, P., Weng, N. Y., Wang, Y. (2012). Assessing the impact of iron-based nanoparticles on pH, dissolved organic carbon, and nutrient availability in soils. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 21(1): 101-114. <https://doi.org/10.1080/15320383.2012.636778>.
- Zhu, Y., Wu, J., Chen, M., Liu, X., Xiong, Y., Wang, Y., Fen, T., Kang, S., Wang, X. (2019). Recent advances in the biotoxicity of metal oxide nanoparticles: Impacts on plants, animals and microorganisms. *Chemosphere*, 237: 124403. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124403>.