ISBN: 978-628-96613-1-6. ISSN: 2414-6390. Digital Object Identifier: https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.516

Ecotoxicity of chemically synthesis and biogenic synthesis nanoparticles: A systematic review of their impact on soil

Daniel Briceño-Dioses[1, 2]; David Asmat-Campos[2, 3]
[1]Universidad Privada del Norte, Facultad de Ingeniería, Carrera de Ingeniería Ambiental, Trujilo, Perú, danbri2301@gmail.com
[2]Laboratorio de Investigación en Nanotecnología, Universidad Privada del Norte, Perú, david.asmat@upn.edu.pe
[3]Grupo de Investigación en Ciencias Aplicadas y Nuevas Tecnologías, Universidad Privada del Norte, Trujillo, Perú.

Abstract– ***This systematic review article addresses the impact of nanoparticles on soil ecosystems, particularly within the context of agriculture and environmental sustainability. Both the benefits and risks of nanoparticles in the soil are explored, emphasizing their potential to enhance agricultural productivity, promote plant growth under stress conditions, and contribute to the remediation of contaminated soils. However, the article also examines their ecotoxicological effects, such as damage to soil organisms and disruption of microbial communities, which could compromise soil health and biodiversity. Furthermore, the risks associated with the bioaccumulation of nanoparticles and their interaction with other soil contaminants are discussed. The article underscores the need for further research into the physicochemical properties of nanoparticles and their long-term effects, aiming to guide their responsible use in agricultural and environmental applications.***

Keywords: Ecotoxicity, Nanoparticles, Soil, Chemical Synthesis, Biogenic Synthesis.

Ecotoxicidad de nanopartículas de síntesis química y síntesis biogénica: Una revisión sistemática de su impacto en el suelo

Daniel Briceño-Dioses[1, 2]; David Asmat-Campos[2, 3]
[1]Universidad Privada del Norte, Facultad de Ingeniería, Carrera de Ingeniería Ambiental, Trujilo, Perú, danbri2301@gmail.com
[2]Laboratorio de Investigación en Nanotecnología, Universidad Privada del Norte, Perú, david.asmat@upn.edu.pe
[3]Grupo de Investigación en Ciencias Aplicadas y Nuevas Tecnologías, Universidad Privada del Norte, Trujillo, Perú.

Resumen– ***Este artículo de revisión sistemática aborda el impacto de las nanopartículas en los ecosistemas del suelo, especialmente en el contexto de la agricultura y la sostenibilidad ambiental. Se exploran tanto los beneficios como los riesgos de las nanopartículas en el suelo, destacando su capacidad para mejorar la productividad agrícola, promover el crecimiento de las plantas bajo condiciones de estrés y contribuir a la remediación de suelos contaminados. Sin embargo, se analizan también sus efectos ecotóxicos, como el daño a organismos del suelo y la alteración de las comunidades microbianas, lo que puede comprometer la salud del suelo y la biodiversidad. Además, se discuten los riesgos derivados de la bioacumulación de nanopartículas y su interacción con otros contaminantes del suelo. El artículo resalta la necesidad de investigaciones más profundas sobre las propiedades fisicoquímicas de las nanopartículas y sus efectos a largo plazo, con el fin de guiar su uso responsable en aplicaciones agrícolas y ambientales.***

Palabras clave— Ecotoxicidad, Nanopartículas, Suelo, Síntesis Química, Síntesis Biogénica.

I. Introducción

En los últimos años, el uso global de plásticos ha crecido de manera considerable, y los residuos plásticos se han convertido en un contaminante ampliamente reconocido en todo el ecosistema [1]. La contaminación por plásticos, en sus distintas formas, se ha transformado en la mayor amenaza ambiental. Los fragmentos de plástico de pequeño tamaño, como los microplásticos y nanoplasticos, tanto de fuentes primarias como secundarias, representan una preocupación global significativa debido a sus efectos negativos sobre el medio ambiente y la salud [2]. La degradación de los plásticos es provocada por diversos procesos, lo que resulta en la formación y liberación de nanopartículas plásticas, conocidas también como nanoplasticos [3].

A pesar del incremento de las preocupaciones por los efectos perjudiciales de los micro y nanoplásticos (MNP), aún no se han desarrollado directrices o protocolos estandarizados para la realización de pruebas de ecotoxicidad de micro y nanoplasticos (MNP) [4].

Además, resulta complicado encontrar estudios sistemáticos que aborden los efectos de estas nanopartículas en organismos de diferentes niveles de la cadena alimentaria, lo cual ofrecería una visión más completa de su ecotoxicidad [5]. Por ello, es necesario optimizar el diseño en el muestreo, las pruebas y el registro de resultados mediante métodos armonizados, validados y comparables, acompañados de informes más detallados sobre los datos relevantes [6]. En consecuencia, un análisis de sensibilidad ha identificado tasas críticas de biodegradación para distintos tamaños de plástico, los cuales resultan en emisiones máximas de Gases de efecto invernadero (GEI) [7]. Así mismo, los estudios actuales señalan que tanto los nanoplásticos (NPL) como las nanopartículas de plata (AgNP) reducen el peso seco y la proporción entre el sistema de raíces y la parte aérea de las plantas, inhiben el desarrollo de sus raíces, y afectan la fotosíntesis [8]. Por lo que, es importante tomar en cuenta en las investigaciones, los niveles de ecotoxicidad que pueden presentar los bioplásticos funcionalizados con síntesis químicas o síntesis biogénicas.

Tal y como se da a conocer, la falta de preocupación ha provocado que no se desarrollen protocolos estandarizados que permitan evaluar de manera más confiable los riesgos de estas nanopartículas en el suelo, así también conlleva a una falta de información y comprensión de los riesgos ecotoxicológicos que presentan las nanopartículas de origen químico y biogénico.

Esta revisión sistemática se enfoca en dar respuesta a la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles son los efectos ecotoxicológicos de las nanopartículas de síntesis química y biogénica en organismos del suelo y qué impacto ambiental pueden tener? Con este propósito, el objetivo de la presente revisión es analizar y sintetizar la evidencia existente sobre los efectos ecotoxicológicos de las nanopartículas de síntesis química y biogénica en organismos del suelo de distintos niveles tróficos, evaluando sus posibles repercusiones en los ecosistemas terrestres.

II. METODOLOGÍA

En el presente estudio, se desarrolló mediante la metodología PRISMA, debido que este método permite demostrar la idoneidad de los métodos y mostrar una mayor confiabilidad de los resultados de la búsqueda, al proporcionar una estructura que organiza los avances en la revisión bibliográfica, estandarizando tanto la información como su calidad [9].

Así mismo, basándonos en lo mencionado anteriormente, para la búsqueda de la información se utilizaron bases de datos de gran fiabilidad e innovación, dada la limitada disponibilidad de estudios en el campo de la ecotoxicidad. Por ello, se establecieron las siguientes bases de datos: Nature, Science Direct, MDPI y Springer.

Los criterios de elegibilidad se rigieron en el periodo de tiempo de los artículos, el cual se tenían que encontrar entre los años 2022 y 2024, así también estar enfocado en la ecotoxicidad de nanopartículas de síntesis química y síntesis biogénica, idioma (inglés o español), presentar estructura IMRD y finalmente tener en consideración nanopartículas de Plata (NPs Ag), nanopartículas de Óxido de Zinc (NPs ZnO). Sumado a ello, se descartaron las investigaciones que no cumplían con las restricciones ya mencionadas, así mismo tener una relevancia significativa en los quartiles (Q1/Q2) en Scopus.

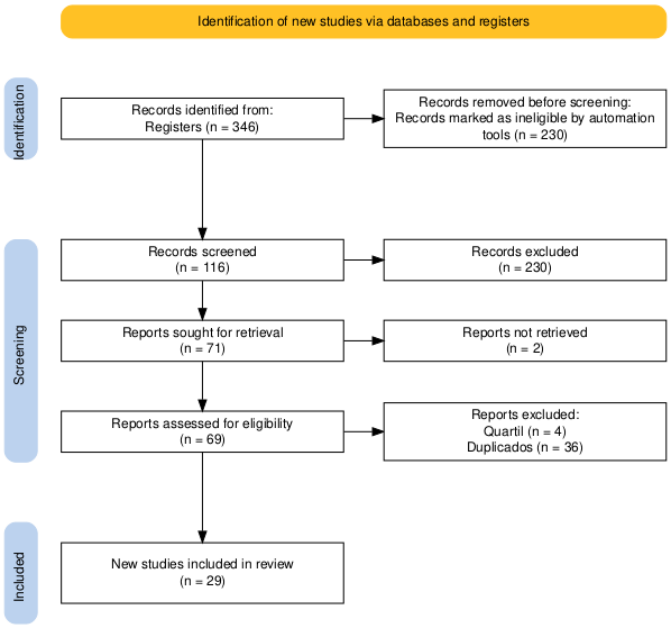

Figura 1. Diagrama de Flujo para la identificación y selección de estudios.

III. RESULTADOS

Mediante un manejo estratégico de las bases de datos y una rigurosa aplicación de criterios de inclusión y exclusión, se seleccionaron un total de 29 artículos. Gracias a ello, en la Tabla 1 se resaltan las características principales de estos estudios, clasificándolos según su tipo y periodo de publicación, lo que permitió obtener la Número de manuscritos (N°) y el porcentaje de representatividad, proporcionando un análisis exhaustivo y de alto impacto.

Tabla 1. Caracterización de los estudios

Tipo de documento	N°	%	Año de publicación	F	%
Artículos Científicos	29	100.0	2022	9	31.0
			2023	6	20.7
			2024	14	48.3
TOTAL	29	100	**TOTAL**	29	100.0

Así también, debido a la aplicación de los criterios de exclusión e inclusión, se obtuvo un total de 29 investigaciones. Por ello, en la siguiente Tabla II se da a conocer el número de artículos que corresponden a las bases de datos y su frecuencia.

Tabla 2. Porcentaje de estudios de acuerdo con su base de datos

Base de Datos	**N° de Estudios**	**%**
Science Direct	10	34.5
Nature	13	44.8
Springer	4	13.8
MDPI	2	6.9
Total de Estudios	29	100.0

De tal manera, gracias a la búsqueda y exclusión de los estudios se lograron identificar las investigaciones de Nps ZnO y Nps Ag. En la Tabla III se menciona el Tipo de síntesis, Tipo de Nanopartículas (NPs), Organismos Evaluados, Concentración de la Muestra [C].

Tabla 3. Caracterización de artículos

Tipo de NPs	**Tipo de síntesis**	**Organismos Evaluados**	**[C]**	**Rf.**
TiO_2 NPs, Ag NPs, Ag/Ti NPs	Green synthesis	*Lactuca sativa*, *Cucumis sativus*, *Brassica oleracea*. (Semillas)	12.5, 25,50,100 (μg/mL)	[10]
Ag NPs	-	*Eisenia fetida* (Lombriz)	60, 80, 100 (mg/Kg)	[11]

Ag NPs	-	*Folsomia candida* (Colembolo)	0, 0.1, 1, 10, 100, 1000 (mg/Kg)	[12]
ZnO NPs	-	Enzimas del suelo	-	[13]
ZnO NPs	Chemical synthesis	*Vigna Angularis* (Semillas)	-	[14]
Ag NPs, Ag_2S	-	*Aporrectodea Caliginosa* (Lombriz)	0, 1, 5, 10, 50, 100, 250, 500, 750, 1000 (mg/Kg)	[15]
ZnO NPs, CuO NPs	Chemical syntesys	*Hordeum Vulgare L.* (Cebada)	2200, 1320 mg/Kg	[16]
CuO, ZnO, NiO, Co_3O_4(NPs y MPs)	Chemical synthesis	*Azotobacter sp., Catalasa, deshidrogenasa*, rábano (Bacterias y Planta)	3, 10, 30 veces respecto a la concentración base	[17]
Ag (NPs y MPs)	Chemical synthesis	*Azotobacter sp., Catalasa, deshidrogenasa*, ferrireductasa, rábano (Bacterias y Planta)	1, 10, 100 mg/Kg	[18]
Ag NPs	Green and Chemical Synthesis	*Staphylococcus aureus* (Bacteria)	45,40, 25, 5 (μg/mL)	[19]
DHM-Ag NPs	Green Synthesis	*Artemia Nauplii* (Larva), *Eudrilus euginae* (Lombriz)	0.5, 5, 10 (DHM-AgNPs: mL/Kg, Urea: g/kg, *Vibrio spp*. (Bacteria) Glifosato: mL/Kg)	[20]
VT-Ag NPs	Green rapid Biogenic synthesis	*Chlorella vulgaris* (Algas)	50, 100, 150, 200, 250 (μg/mL)	[21]
Fe_3O_4 WP, Fe_3O_4/Ag WP, Fe_3O_4 OP, Fe_3O_4/Ag OP	Chemical synthesis	Radish, oat	250, 500, 750, 1000 (mg/kg)	[5]

IV. DISCUSIÓN

La ecotoxicidad de las nanopartículas y su impacto en los ecosistemas del suelo es un tema de creciente interés en la investigación ambiental, especialmente en el contexto de la agricultura moderna y la sostenibilidad. En un estudio reciente, se evaluaron NP Ag y NP TiO_2 sintetizadas mediante un método ecológico con extracto de Aloe vera. Los resultados demostraron que estas nanopartículas, en concentraciones de 12,5 a 100 mg/mL, mostraron efectos fitotóxicos variables en especies como *Lactuca sativa*, *Cucumis sativus* y *Brassica oleracea*. Además, se reportó una reducción de la toxicidad en el suelo y una alta biocompatibilidad en células VERO y L929, evaluada mediante el ensayo MTT, destacando su potencial como una alternativa sostenible con menor impacto ambiental [10]. Se investigaron los efectos de la exposición acumulativa a NP Ag en lombrices de tierra (*Eisenia fetida*), revelando impactos significativos en su salud y comportamiento [11]. Asimismo, se evaluaron parámetros como la supervivencia, la bioacumulación y las alteraciones fisiológicas bajo exposiciones progresivas. Los resultados destacaron la necesidad de considerar los riesgos ecotoxicológicos de las NP Ag, ya que su presencia en el medio ambiente podría afectar negativamente a organismos importantes en la dinámica del suelo, como las lombrices, y alterar los procesos ecológicos esenciales. Un estudio reciente examinó cómo la presencia de microplásticos incrementa la toxicidad de las nanopartículas de plata (AgNPs) en el colémbolo *Folsomia candida*. Los resultados sugieren que la interacción entre microplásticos y NP Ag aumenta los efectos tóxicos sobre este organismo del suelo, lo que resalta la importancia de evaluar de manera integral los riesgos ecotoxicológicos de estas contaminaciones combinadas [12]. Asimismo, se investigó los efectos de las NP ZnO sobre

la descomposición de la paja en suelos agrícolas, utilizando análisis de actividades microbianas y técnicas isotópicas. Los resultados mostraron que la presencia de ZnO alteró las actividades microbianas, interfiriendo con los procesos naturales de descomposición [13]. A nivel de aplicaciones, una investigación desarrolló una película activa para envasado de alimentos, combinando almidón, quitosano y mucílago de taro con NP ZnO. Esta película mostró mejoras en sus propiedades mecánicas y actividad antibacteriana. Además, se evaluó su ecotoxicidad y los resultados sugieren que las nanopartículas de ZnO pueden ser una opción viable para mejorar el envasado sin comprometer la seguridad ambiental [14]. Otro estudio reciente evaluó los efectos ecotoxicológicos de las nanopartículas de plata (AgNPs) y el sulfuro de plata (Ag_2S) en la lombriz de tierra endógena *Aporrectodea caliginosa*. Los resultados mostraron que las NP Ag redujeron la biomasa y aumentaron la tasa de mortalidad, además de inhibir la producción de cápsulas en los primeros tres meses de exposición. Por otro lado, se observó que las lombrices evitaron suelos contaminados con NP Ag, pero no con Ag_2S, el cual no afectó la reproducción [15]. Otra investigación evaluó los efectos de los óxidos de zinc (ZnO) y cobre (CuO) en su forma a granel y como nanopartículas sobre las comunidades microbianas del suelo y el crecimiento de *Hordeum vulgare*. Los resultados indicaron que la presencia de estos metales pesados aumentó la abundancia de microorganismos cultivables, pero disminuyó la actividad enzimática relacionada con el ciclo del nitrógeno, especialmente en suelos Fluvisol. Además, los metales pesados indujeron estrés oxidativo en las plantas, activando sus mecanismos de defensa antioxidante [16]. A nivel agronómico, se investigó la ecotoxicidad de nanopartículas y micropartículas de óxidos metálicos (CuO, ZnO, NiO y Co_3O_4) en el suelo, utilizando indicadores biológicos como la abundancia bacteriana, la actividad enzimática y la germinación de semillas de rábano. Los resultados mostraron que las nanopartículas de ZnO y Co_3O_4 fueron las más ecotóxicas, mientras que las de NiO y CuO tuvieron un impacto menor. Además, se observó que las nanopartículas causaron un mayor daño al suelo en comparación con sus formas microparticuladas, destacando los riesgos ecológicos asociados con las nanopartículas en el medio ambiente [17]. Un estudio reciente evaluó la ecotoxicidad de partículas de plata de diferentes tamaños (10, 100 y 1000 nm) en *chernozem haplico*, encontrando que las nanopartículas de 10 nm causaron un mayor impacto ecotóxico en comparación con las partículas de mayor tamaño. Este efecto negativo aumentó con la concentración de plata en el suelo, siendo más pronunciado a concentraciones de 100 mg/kg. Los indicadores fitotóxicos fueron particularmente sensibles a la contaminación por nanopartículas de plata, sugiriendo que estos parámetros son útiles para el biodiagnóstico de la ecotoxicidad de estas partículas en el medio ambiente [18]. También se ha comparado la efectividad antibacteriana de nanopartículas de plata sintetizadas mediante métodos verdes y químicos, encontrando que las nanopartículas obtenidas por síntesis verde mostraron una mayor actividad contra *Staphylococcus aureus*. Este hallazgo resalta el potencial de los métodos verdes como una alternativa más eficiente y ecológica para la producción de nanopartículas de plata, con aplicaciones terapéuticas efectivas [19]. Se evaluó las NP Ag sintetizadas mediante un proceso verde utilizando extractos de dos hierbas, analizando su eficacia antimicrobiana y su ecotoxicidad en sistemas agrícolas y acuáticos Los resultados mostraron que las DHM-AgNPs poseen una destacada actividad antimicrobiana y presentan una baja ecotoxicidad, lo que las convierte en una opción prometedora como alternativa ecológica para el control de patógenos en diversos entornos, con un impacto mínimo en el medio ambiente [20]. Otro estudio reciente sintetizó NP Ag utilizando extracto de hojas de *Vitex trifolia* y evaluó sus propiedades antibacterianas, antioxidantes y de degradación de colorantes. Las nanopartículas, con tamaños en el rango de 10-50 nm, demostraron una alta eficacia antimicrobiana contra *Staphylococcus aureus*, *Vibrio cholerae* y *Klebsiella pneumoniae*, con una inhibición máxima a 75 µg/mL. Además, presentaron actividad antioxidante significativa y capacidad fotocatalítica para degradar el colorante azul de metileno. Sin embargo, se observó ecotoxicidad en *Chlorella vulgaris* a altas concentraciones sugiere la necesidad de considerar su impacto ambiental [21]. También, se evaluó la ecotoxicidad de nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4) y magnetita/Ag en organismos terrestres y acuáticos. Se utilizó una variedad de modelos, incluyendo plantas (*Raphanus sativus*, avena), bacterias marinas (*Aliivibrio fischeri*) y crustáceos (*H. azteca*). Los resultados mostraron que ambas nanopartículas tuvieron diferentes grados de toxicidad dependiendo del organismo y del nivel trófico. Este estudio subraya la importancia de evaluar las propiedades específicas de las nanopartículas y sus interacciones con los organismos para entender los riesgos ambientales potenciales de su liberación [5].

Las nanopartículas, debido a sus propiedades fisicoquímicas únicas, pueden interactuar con los componentes del suelo y los organismos de maneras que no se comprenden completamente. Esta interacción puede tener efectos tanto beneficiosos como perjudiciales, dependiendo del tipo de nanopartículas, su concentración y el entorno específico del suelo. Uno de los principales problemas asociados con la introducción de nanopartículas en el suelo es su potencial ecotóxico. Por ejemplo, las nanopartículas de plata (AgNPs) han sido ampliamente estudiadas por sus propiedades antimicrobianas, pero también se ha demostrado que tienen efectos adversos sobre los invertebrados del suelo, como las lombrices de tierra. Estas nanopartículas pueden inducir estrés oxidativo y daño celular en estos organismos, lo que puede resultar en una disminución de su población y, por ende, en la alteración de los procesos de ciclado de nutrientes y la estructura del suelo [22],[23]. La exposición a AgNPs puede afectar la reproducción y la supervivencia de las lombrices, lo que resalta la necesidad de evaluar cuidadosamente los riesgos asociados con su uso en aplicaciones agrícolas [22]. La interacción de las nanopartículas con las comunidades

microbianas del suelo también es un área crítica de preocupación. Los microorganismos del suelo son esenciales para la descomposición de la materia orgánica y el ciclado de nutrientes. La introducción de nanopartículas puede alterar estas comunidades, inhibiendo el crecimiento de bacterias beneficiosas y promoviendo especies patógenas. Un estudio reciente ha demostrado que las nanopartículas pueden afectar negativamente la diversidad microbiana y la actividad enzimática del suelo, lo que podría tener implicaciones significativas para la fertilidad del suelo y la salud de las plantas [24];[25]. Estos cambios en la comunidad microbiana pueden afectar la disponibilidad de nutrientes, lo que a su vez impacta el crecimiento de las plantas y la productividad agrícola. Además, la capacidad de las nanopartículas para interactuar con otros contaminantes del suelo plantea riesgos adicionales. Por ejemplo, las nanopartículas de hierro cero valente (nZVI) se han utilizado para la remediación de suelos contaminados con metales pesados como el cromo (Cr) y los bifenilos policlorados (PCBs). Sin embargo, la presencia de múltiples contaminantes puede inducir fenómenos competitivos que afectan la eficacia de las nanopartículas en la remediación [25];[26]. La interacción entre nanopartículas y contaminantes existentes en el suelo es un área que requiere más investigación para comprender completamente sus implicaciones para la salud del suelo y la biota. Las propiedades fisicoquímicas de las nanopartículas, como el tamaño, la forma y la carga superficial, influyen significativamente en su comportamiento en los entornos del suelo. Las nanopartículas más pequeñas tienden a mostrar una mayor movilidad, lo que puede aumentar su riesgo ecológico al facilitar su transporte a través de los suelos y su posible absorción por las plantas [22]. Además, las modificaciones en la superficie de las nanopartículas pueden alterar sus interacciones con los componentes del suelo, afectando su toxicidad y biodisponibilidad [22]. Comprender estas propiedades es importante para predecir el destino de las nanopartículas en los ecosistemas del suelo y sus posibles impactos en la salud del suelo. El potencial de las nanopartículas para mejorar la productividad agrícola es otro aspecto importante de su aplicación en la gestión del suelo.

Otra investigación, analiza el impacto de las nanopartículas de óxido de zinc (ZnO NP) en plantas de arroz cultivadas en suelo salino-sódico, destacando los posibles beneficios del uso de nanopartículas para mejorar el crecimiento de las plantas en condiciones de estrés. El estudio demuestra que las ZnO NP mejoran la absorción de zinc y la fluorescencia de la clorofila, que son cruciales para la fotosíntesis [27]. Esto coincide con los hallazgos de otros estudios que indican que las nanopartículas pueden influir en la dinámica de los nutrientes y mejorar la resiliencia de las plantas en condiciones de suelo difíciles. Por ejemplo, se explora la ecotoxicidad de las nanopartículas de plata (Ag-NP) en los organismos del suelo, enfatizando la necesidad de comprender cómo estos materiales interactúan con los ecosistemas terrestres [28] . De manera similar, se analiza los mecanismos de toxicidad en las Ag-NP, incluido el estrés oxidativo y el daño al ADN, que podrían ser relevantes al considerar las implicaciones más amplias del uso de nanopartículas en la agricultura [22]. Además, otros autores destacan el impacto de los micro y nanoplásticos en las propiedades del suelo, indicando que estos contaminantes pueden alterar la salud del suelo y afectar el crecimiento de las plantas [29]. Esto es particularmente relevante en el contexto del uso de nanopartículas, ya que su introducción en los ecosistemas del suelo debe evaluarse cuidadosamente para evitar efectos adversos. Además, también se examina los efectos de las nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2) en la germinación de las semillas y el crecimiento de las plántulas, revelando que las concentraciones bajas pueden ser beneficiosas mientras que las concentraciones más altas pueden causar daño tisular [30]. Esta dualidad en los efectos de las nanopartículas subraya la importancia de la dosis y el contexto ambiental, como se ve en el estudio de las nanopartículas de ZnO, donde las nanopartículas mejoraron el rendimiento de las plantas bajo estrés salino-sódico. Con respecto a la distribución espacial de elementos potencialmente tóxicos en los suelos enfatizan aún más la necesidad de evaluaciones integrales de las interacciones de las nanopartículas en los ecosistemas del suelo. Comprender cómo las nanopartículas pueden contribuir o mitigar la contaminación del suelo es esencial para las prácticas agrícolas sostenibles [31]. Además, [32] analiza el potencial de remediación de diversos tipos de desechos contra el drenaje ácido de minas, lo que coincide con la necesidad de estrategias eficaces para gestionar la contaminación por nanopartículas en los suelos. Los conocimientos adquiridos a partir de estos estudios pueden servir de base para las mejores prácticas de uso de nanopartículas en la agricultura, garantizando que se maximicen sus beneficios y se minimicen los posibles riesgos ecológicos. Se ha demostrado que las nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) mejoran la absorción de nutrientes y promueven el crecimiento de las plantas, especialmente en suelos deficientes en nutrientes [33]. Sin embargo, la naturaleza dual de las nanopartículas, donde pueden ser tanto beneficiosas como perjudiciales, requiere un enfoque matizado para su aplicación en la agricultura. La investigación debe centrarse en identificar las concentraciones óptimas y las condiciones bajo las cuales las nanopartículas pueden ser más efectivas sin comprometer la salud del suelo. La acumulación de nanopartículas en el suelo plantea preocupaciones sobre sus efectos a largo plazo en la salud del suelo y la estabilidad del ecosistema. La exposición continua a nanopartículas puede llevar a la bioacumulación en organismos del suelo, lo que podría interrumpir las cadenas alimentarias y las interacciones ecológicas [34];[35]. La persistencia de las nanopartículas en el medio ambiente, junto con su potencial para interactuar con otros contaminantes, presenta desafíos significativos para la gestión y conservación del suelo. Además, el uso de nanopartículas en la agricultura puede tener implicaciones en la calidad de los productos alimenticios. Por ejemplo, se ha demostrado que las nanopartículas de plata pueden acumularse en las plantas, lo que plantea preocupaciones sobre la seguridad alimentaria y la salud humana [36]. La transferencia de

nanopartículas a través de la cadena alimentaria es un área que requiere más investigación para comprender completamente los riesgos potenciales para la salud pública. La investigación sobre la toxicidad de las nanopartículas también ha revelado que diferentes tipos de nanopartículas pueden tener diferentes mecanismos de acción en los organismos del suelo. Por ejemplo, se ha demostrado que las nanopartículas de óxido de hierro pueden inducir estrés oxidativo en los organismos del suelo, mientras que las nanopartículas de plata pueden causar daño en el ADN y afectar la reproducción [22];[37]. En tal sentido, el impacto de las nanopartículas en los ecosistemas del suelo es multifacético, abarcando tanto efectos beneficiosos como perjudiciales. Si bien las nanopartículas tienen el potencial de mejorar la productividad agrícola y remediar suelos contaminados, sus riesgos potenciales para la salud del suelo y la integridad del ecosistema no deben ser pasados por alto. Se necesita una investigación completa para dilucidar las complejas interacciones entre las nanopartículas, los componentes del suelo y los organismos vivos, guiando así el uso responsable de la nanotecnología en aplicaciones ambientales.

CONCLUSIONES

La investigación sobre la ecotoxicidad de las nanopartículas y su impacto en los ecosistemas del suelo resalta tanto sus posibles beneficios como sus riesgos ambientales. Por un lado, las nanopartículas pueden mejorar la productividad agrícola, promover el crecimiento de las plantas en suelos estresados y ayudar en la remediación de suelos contaminados. Las nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) y las de plata (AgNPs) han demostrado, por ejemplo, mejorar la absorción de nutrientes y promover la resiliencia de las plantas bajo condiciones de estrés. Sin embargo, también se ha observado que su introducción en el suelo puede tener efectos negativos, como la alteración de las comunidades microbianas y la ecotoxicidad en organismos del suelo, como las lombrices. La exposición prolongada a estas nanopartículas puede inducir estrés oxidativo, daño celular e incluso afectar la reproducción y la supervivencia de los organismos del suelo, lo que puede comprometer la salud del suelo y alterar los procesos ecológicos, como el ciclado de nutrientes. Además, la persistencia de las nanopartículas en el medio ambiente y su potencial para interactuar con otros contaminantes del suelo plantea riesgos adicionales que requieren una investigación más profunda. La acumulación de nanopartículas en el suelo podría llevar a la bioacumulación en organismos y afectar las cadenas alimentarias. Aunque los estudios destacan los beneficios potenciales de las nanopartículas, especialmente en el ámbito agrícola, es necesario un enfoque equilibrado y regulado para su uso. Las propiedades fisicoquímicas de las nanopartículas, como su tamaño y forma, influyen en su comportamiento en el suelo, y entender estos factores es esencial para evaluar sus impactos ecológicos.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen a la Dirección de Investigación, Innovación y Sostenibilidad (DIIS), de la Universidad Privada del Norte (UPN), por el apoyo para el financiamiento del proyecto N° UPN 20241006.

REFERENCIAS

[1] M. K. Nguyen *et al.*, "Ecotoxicity of micro- and nanoplastics on aquatic algae: Facts, challenges, and future opportunities," *J Environ Manage*, vol. 346, 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.118982.

[2] G. Lamichhane *et al.*, "Microplastics in environment: global concern, challenges, and controlling measures," Apr. 01, 2023, *Institute for Ionics*. doi: 10.1007/s13762-022-04261-1.

[3] D. Masson *et al.*, "Are nanoplastics potentially toxic for plants and rhizobiota? Current knowledge and recommendations," *NanoImpact*, vol. 31, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.impact.2023.100473.

[4] F. Abdolahpur Monikh *et al.*, "Exposure protocol for ecotoxicity testing of microplastics and nanoplastics," *Nat Protoc*, vol. 18, no. 11, 2023, doi: 10.1038/s41596-023-00886-9.

[5] U. Klekotka, D. Rogacz, I. Szymanek, J. Malejko, P. Rychter, and B. Kalska-Szostko, "Ecotoxicological assessment of magnetite and magnetite/Ag nanoparticles on terrestrial and aquatic biota from different trophic levels," *Chemosphere*, vol. 308, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.136207.

[6] C. Askham *et al.*, "Generating environmental sampling and testing data for micro- and nanoplastics for use in life cycle impact assessment," *Science of the Total Environment*, vol. 859, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160038.

[7] Z. Piao, A. A. Agyei Boakye, and Y. Yao, "Environmental impacts of biodegradable microplastics," *Nature Chemical Engineering*, vol. 1, no. 10, pp. 661–669, Sep. 2024, doi: 10.1038/s44286-024-00127-0.

[8] J. Shi *et al.*, "The combined contamination of nano-polystyrene and nanoAg: Uptake, translocation and ecotoxicity effects on willow saplings," *Science of the Total Environment*, vol. 905, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.167291.

[9] M. J. Page *et al.*, "The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews," 2021. doi: 10.1136/bmj.n71.

[10] P. C. L. Muraro *et al.*, "Ecotoxicity and in vitro safety profile of the eco-friendly silver and titanium dioxide nanoparticles," *Process Safety and Environmental*

Protection, vol. 188, pp. 584–594, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.psep.2024.05.151.

[11] C. Huang *et al.*, "Impact of progressively cumulative exposure of AgNPs on earthworms (Eisenia fetida) and implication for eco-toxicological risk assessment," *Chemosphere*, vol. 322, May 2023, doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.138163.

[12] Y. Ding, J. T. Zheng, Y. N. Wang, D. Wu, and D. Zhu, "Presence of microplastics enhanced the toxicity of silver nanoparticles on the collembolan Folsomia candida," *Chemosphere*, vol. 366, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.143557.

[13] J. Zhang *et al.*, "Integrated microbial activities and isotope analysis unveil the effects of zinc oxide nanoparticles on straw decomposition in agricultural soil," *Science of the Total Environment*, vol. 957, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.177460.

[14] S. Priyanka, S. Karthick Raja Namasivayam, F. K. John, and Meivelu Moovendhan, "Starch-chitosan-Taro mucilage nanocomposite active food packaging film doped with zinc oxide nanoparticles – Fabrication, mechanical properties, anti-bacterial activity and eco toxicity assessment," *Int J Biol Macromol*, vol. 277, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.134319.

[15] J. M. Kister, C. N. Lowe, and K. R. Butt, "Potential ecotoxicological effects of silver nanoparticles and silver sulphide on the endogeic earthworm Aporrectodea caliginosa (Savigny 1826)," *Ecotoxicology*, vol. 32, no. 9, pp. 1152–1161, Nov. 2023, doi: 10.1007/s10646-023-02705-z.

[16] E. P. Pulikova *et al.*, "Effects of bulk forms and nanoparticles of zinc and copper oxides on the abundance, nitrogen cycling and enzymatic activities of microbial communities, morphometric parameters and antioxidant status of Hordeum vulgare L," *Environ Geochem Health*, vol. 46, no. 12, Dec. 2024, doi: 10.1007/s10653-024-02258-y.

[17] S. Kolesnikov *et al.*, "Comparative estimation of ecotoxicity of nano- and microparticles of CuO, ZnO, NiO, Co3O4 by the integral biological indicator of soil state," *Nanotechnology for Environmental Engineering*, vol. 9, no. 2, pp. 255–265, Jun. 2024, doi: 10.1007/s41204-024-00358-9.

[18] N. I. Tsepina, S. I. Kolesnikov, T. V. Minnikova, A. S. Ruseva, D. A. Trufanov, and K. S. Kazeev, "Assessment of Ecotoxicity of Silver Particles Different in Size according to Biological Indicators in Haplic Chernozem," *Eurasian Soil Science*, vol. 57, no. 5, pp. 865–874, May 2024, doi: 10.1134/S1064229323603645.

[19] M. K. Secario, T. T. V. Truong, C. C. Chen, J. Y. Lai, and S. J. Lue, "Exploring antibacterial effectiveness: A comparative analysis of green and chemical synthesis of silver nanoparticles against Staphylococcus aureus," *J Taiwan Inst Chem Eng*, vol. 165, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.jtice.2024.105750.

[20] K. Nagarajan, R. Thamarai, C. Kamaraj, K. A. Al-Ghanim, K. Subramaniam, and G. Malafaia, "Green synthesis and evaluation of dual herb-extracted DHM-AgNPs: Antimicrobial efficacy and low ecotoxicity in agricultural and aquatic systems," *J Environ Manage*, vol. 370, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.122849.

[21] R. Chinnasamy *et al.*, "Phyto-fabrication of AgNPs using leaf extract of Vitex trifolia: potential to antibacterial, antioxidant, dye degradation, and their evaluation of non-toxicity to Chlorella vulgaris," *Biomass Convers Biorefin*, vol. 14, no. 13, pp. 14903–14920, Jul. 2024, doi: 10.1007/s13399-022-03705-5.

[22] O. Velgosova, L. Mačák, E. Múdra, M. Vojtko, and M. Lisnichuk, "Preparation, Structure, and Properties of PVA–AgNPs Nanocomposites," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 2, 2023, doi: 10.3390/polym15020379.

[23] N. Wang, Z. Liu, Y. Sun, N. Lu, and Y. Luo, "Analysis of soil fertility and toxic metal characteristics in open-pit mining areas in northern Shaanxi," *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-52886-8.

[24] Y. Peng, H. Song, T. Jin, R. Yang, and J. Shi, "Distribution characteristics of potentially toxic metal(loid)s in the soil and in tea plant (Camellia sinensis)," *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, p. 14741, Jun. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-65674-1.

[25] M. Gil-Díaz, R. A. Pérez, J. Alonso, E. Miguel, S. Diez-Pascual, and M. C. Lobo, "Iron nanoparticles to recover a co-contaminated soil with Cr and PCBs," *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-07558-w.

[26] O. Ojo, Z. Vaňková, L. Beesley, N. Wickramasinghe, and M. Komárek, "Evaluating the effectiveness of sulfidated nano zerovalent iron and sludge co-application for reducing metal mobility in contaminated soil," *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, p. 8322, Apr. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-59059-7.

[27] K. Dang *et al.*, "Impact of ZnO NPs on photosynthesis in rice leaves plants grown in saline-sodic soil," *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, p. 16233, Jul. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-66935-9.

[28] F. Turki, R. Ben Younes, M. Sakly, K. Ben Rhouma, J. L. Martinez-Guitarte, and S. Amara, "Effect of silver nanoparticles on gene transcription of land snail Helix aspersa," *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-06090-1.

[29] E. Liwarska-Bizukojc, "Effect of Innovative Bio-Based Plastics on Early Growth of Higher Plants," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 2, 2023, doi: 10.3390/polym15020438.

[30] C. C. Li *et al.*, "Exposure to low levels of photocatalytic TiO2 nanoparticles enhances seed germination and seedling growth of amaranth and cruciferous

vegetables," *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-23179-9.

[31] O. Rahmonov, M. Sobala, D. Środek, D. Karkosz, S. Pytel, and M. Rahmonov, "The spatial distribution of potentially toxic elements in the mountain forest topsoils (the Silesian Beskids, southern Poland)," *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, 2024, doi: 10.1038/s41598-023-50817-7.

[32] A. Aguilar-Garrido, M. Paniagua-López, M. Sierra-Aragón, F. J. Martínez Garzón, and F. J. Martín-Peinado, "Remediation potential of mining, agro-industrial, and urban wastes against acid mine drainage," *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-39266-4.

[33] A. S. Shahzad *et al.*, "Acidified biochar improves lead tolerance and enhances morphological and biochemical attributes of mint in saline soil," *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-36018-2.

[34] S. Sharma, P. Kumari, P. Thakur, G. S. Brar, N. A. Bouqellah, and A. E. L. Hesham, "Synthesis and characterization of Ni0.5Al0.5Fe2O4 nanoparticles for potent antifungal activity against dry rot of ginger (Fusarium oxysporum)," *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-22620-3.

[35] M. Shahzad Shirazi, M. Moridi Farimani, A. Foroumadi, K. Ghanemi, M. Benaglia, and P. Makvandi, "Bioengineered synthesis of phytochemical-adorned green silver oxide (Ag2O) nanoparticles via Mentha pulegium and Ficus carica extracts with high antioxidant, antibacterial, and antifungal activities," *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-26021-4.

[36] M. Szymczak *et al.*, "An effective antibiofilm strategy based on bacteriophages armed with silver nanoparticles," *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, p. 9088, Apr. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-59866-y.

[37] A. Shoaib, S. Khurshid, and A. Javaid, "Cloncurry buffel grass mitigated Cr(III) and Cr(VI) toxicity in tomato plant," *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-25604-5.