

Efectos de los microplásticos en la disponibilidad de fósforo de suelos y sostenibilidad agrícola: una revisión sistemática¹

Effects of Microplastics on Soil Phosphorus Availability and Agricultural Sustainability:
A Systematic Review

Efeitos dos microplásticos na disponibilidade de fósforo nos solos e na sustentabilidade agrícola:
uma revisão sistemática

Página | 1

Andrés Pinto-Poblete*²
Universidad Adventista de Chile, Chile

Matías Betancur*³
Universidad Adventista de Chile, Chile

María Constanza Arrué⁴
Universidad Adventista de Chile, Chile

Sergio Moraga-Bustos⁵
Universidad Adventista de Chile, Chile

José Leyton⁶
Universidad Adventista de Chile

Constanza García-Castillo⁷
Universidad Adventista de Chile

Autor de correspondencia: Matías Betancur, matiasbetancur@unach.cl

Fecha de recepción: 26-01-2026	Fecha de aceptación: 10-07-2026	Fecha de publicación: 14-07-2026
--------------------------------	---------------------------------	----------------------------------

¹ Copyright: © 2026, Pinto-Poblete, Betancur, Arrué, Moraga-Bustos, Leyton, y García-Castillo. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia **Creative Commons de Atribución No Comercial 4.0**. Permite su uso sin restricciones, su distribución y reproducción por cualquier medio, siempre que no se haga con fines comerciales y el trabajo original sea fielmente citado.

² <https://orcid.org/0000-0001-5124-9621>

³ <https://orcid.org/0000-0003-0762-7175>

⁴ <https://orcid.org/0009-0006-9126-1928>

⁵ <https://orcid.org/0009-0007-7491-6141>

⁶ <https://orcid.org/0009-0005-8978-4706>

⁷ <https://orcid.org/0009-0000-3349-034X>

Cómo citar:

Pinto-Poblete, A.; Betancur, M.; Arrué, M. C.; Moraga-Bustos, S.; Leyton, J. y García-Castillo, C. (2026). Efectos de los microplásticos en la disponibilidad de fósforo de suelos y sostenibilidad agrícola: una revisión sistemática. *Revista Científica Cuadernos de Investigación*, 4, e64, 1-20. <https://doi.org/10.59758/rcci.2026.4.e64>

Resumen

Introducción: La presencia de microplásticos y la deficiencia de fósforo en los suelos constituyen problemáticas globales con implicancias para la producción y la sostenibilidad agrícola. **Objetivo:** Analizar la evidencia científica disponible sobre los efectos de los microplásticos en la dinámica del fósforo en suelos, con énfasis en los mecanismos de interacción y sus consecuencias para la fertilidad y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. **Métodos:** Se realizó una revisión sistemática de literatura en la base de datos Scopus, siguiendo los lineamientos PRISMA. Se incluyeron estudios originales revisados por pares que evaluaron variables asociadas a la disponibilidad, fraccionamiento, mineralización, adsorción, desorción o solubilización del fósforo en suelos. **Resultados:** Se identificaron 61 estudios que cumplieron con los criterios de inclusión. La evidencia mostró que la mayoría de las investigaciones se desarrolló bajo condiciones controladas, principalmente en ensayos de incubación y maceta. En general, la presencia de microplásticos se asoció con una menor disponibilidad de fósforo, alteraciones en su fraccionamiento y cambios en la actividad fosfatasa del suelo, aunque la magnitud y dirección de estos efectos dependieron del tipo de polímero, dosis, tamaño de partícula y condiciones edáficas. **Conclusiones:** Los microplásticos constituyen un modulador relevante del ciclo del fósforo, con implicancias para la eficiencia de fertilización y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

Palabras clave: nanoplásticos; microbioma; fosfatasa; fertilidad de suelo; minerales; fisiología.

Abstract

Introduction: The presence of microplastics and phosphorus deficiency in soils are global issues with implications for agricultural production and sustainability. **Objective:** This review aimed to analyse the available scientific evidence on the effects of microplastics on phosphorus dynamics in soils, with emphasis on interaction mechanisms and their consequences for soil fertility and the sustainability of agricultural systems. **Methods:** The literature search was conducted in the Scopus database, following PRISMA guidelines, and included original peer-reviewed studies that evaluated variables associated with phosphorus availability, fractionation, mineralisation, adsorption, desorption or solubilisation in soils. **Results:** A total of 61 studies met the inclusion criteria. The evidence showed that most studies were conducted under controlled conditions, mainly incubation and pot experiments. Overall, the presence of microplastics was associated with lower phosphorus availability, changes in phosphorus fractionation and alterations in soil phosphatase activity, although the magnitude and direction of these effects depended on polymer type, dose, particle size and soil conditions. **Conclusions:** Microplastics constitute a relevant modulator of the phosphorus cycle, with implications for fertilisation efficiency and the sustainability of agricultural systems.

Keywords: nanoplastics; microbiome; phosphatase; soil fertility; minerals; physiology.

Resumo

Introdução: A presença de microplásticos e a deficiência de fósforo nos solos constituem problemáticas globais com implicações para a produção e a sustentabilidade agrícola. **Objetivo:** Esta revisão teve como objetivo analisar as evidências científicas disponíveis sobre os efeitos dos microplásticos na dinâmica do fósforo nos solos, com ênfase nos mecanismos de interação e em suas consequências para a fertilidade do solo e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. **Métodos:** A busca bibliográfica foi realizada na base de dados Scopus, seguindo as diretrizes PRISMA, e incluiu estudos originais revisados por pares que avaliaram variáveis associadas à disponibilidade, fracionamento, mineralização, adsorção, dessorção ou solubilização do fósforo nos solos. **Resultados:** Um total de 61 estudos atendeu aos critérios de inclusão. As evidências mostraram que a maioria das pesquisas foi conduzida sob condições controladas, principalmente em ensaios de incubação e em vasos. De modo geral, a presença de microplásticos foi associada à menor disponibilidade de fósforo, alterações no seu fracionamento e mudanças na atividade da fosfatase do solo, embora a magnitude e a direção desses efeitos tenham dependido do tipo de polímero, dose, tamanho de partícula e condições edáficas. **Conclusões:** Os microplásticos constituem um modulador relevante do ciclo do fósforo, com implicações para a eficiência da fertilização e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas

Página | 3

Palavras Chave: nanoplasticos; microbioma; fosfatase; fertilidade do solo; minerais; fisiologia.

Introducción

Actualmente, la presencia de microplásticos (MPs) en los sistemas terrestres se ha convertido en un problema ambiental de escala global (Verma et al., 2024). Los MPs, definidos tradicionalmente como partículas plásticas de un tamaño inferior a 5 mm (Rashid et al., 2025), provienen de dos grandes fuentes: (i) materiales manufacturados directamente en tamaños microscópicos, como pellets industriales, abrasivos plásticos o microesferas cosméticas, y (ii) la fragmentación progresiva de plásticos macro-dimensionados que se degradan por acción de la radiación UV, la abrasión mecánica, la oxidación y la actividad biológica (Ibrahim et al., 2025). En ambientes terrestres, la principal vía de entrada está asociada al uso intensivo de plásticos en actividades humanas, siendo especialmente relevante el sector agrícola por el uso continuo de coberturas plásticas, insumos en sistemas de riego, bandejas de propagación, envases y mallas, además de aportes indirectos provenientes del compost, lodos de depuradora, aguas residuales tratadas, uso de fertilizantes y deposición atmosférica (Chaudhary et al., 2024). Como consecuencia, estudios recientes han revelado que los suelos agrícolas pueden contener concentraciones de MPs equivalentes o superiores a las observadas en ambientes acuáticos, desafiando la visión original de que esta contaminación estaba predominantemente asociada a ecosistemas marinos (Cusworth et al., 2024).

Los impactos de los MPs en ecosistemas terrestres son amplios y multifactoriales (Rashid et al., 2025). En el suelo, estas partículas pueden modificar propiedades físicas, químicas y biológicas (Chen et al., 2024). Se ha observado que su presencia se asocia con alteraciones en la agregación, densidad aparente, porosidad y

retención de agua, generando cambios en la dinámica de aireación y en la estructura del suelo que podrían afectar directamente el crecimiento de las plantas (Aminzadeh et al., 2025). Paralelamente, los MPs pueden influir en procesos biogeoquímicos mediante la modificación del pH, la disponibilidad de nutrientes y la capacidad de intercambio de cationes, así como mediante la liberación de aditivos asociados a su manufactura o la asociación con otro tipo de contaminantes inorgánicos (Aralappanavar et al., 2024). A nivel biológico, los cambios en el microbioma del suelo, la actividad enzimática y la respiración microbiana han sido propuestos como vías mediante las cuales los MPs podrían modificar el funcionamiento del suelo (Liu et al., 2023). En sistemas agrícolas, donde la fertilidad del suelo, la disponibilidad de nutrientes y el funcionamiento microbiano son determinantes para la producción, estas alteraciones son relevantes, ya que pueden influir en la eficiencia de fertilización, el crecimiento vegetal y la sostenibilidad del sistema productivo en su conjunto (Masciarelli et al., 2025; Sakin et al., 2025).

En este contexto, el fósforo (P) destaca como uno de los elementos esenciales más limitantes en los sistemas agrícolas (Jahan et al., 2025). A diferencia de otros nutrientes, el P presenta baja movilidad en el suelo y su disponibilidad depende de complejos procesos de adsorción-desorción, precipitación, mineralización de compuestos orgánicos y solubilización microbiana (Balemi et al., 2012). Estos procesos están estrechamente modulados por las características físico-químicas del suelo y por la actividad biológica, por lo que cualquier factor emergente que altere estas propiedades tiene el potencial de modificar significativamente la dinámica del P en el suelo (Lan et al., 2025). La disponibilidad de fósforo es determinante para la productividad agrícola global, ya que la mayoría de los suelos presentan deficiencia natural de este nutriente, y la eficiencia del uso de fertilizantes fosfatados suele ser baja debido a procesos de fijación en minerales de Fe, Al o Ca (Jahan et al., 2025). Además, la creciente presión sobre los recursos minerales de fosfato y los riesgos asociados a pérdidas de P hacia cuerpos de agua subrayan la importancia de comprender en profundidad los factores que pueden alterar su dinámica (Brownlie et al., 2024).

Se han evaluado los efectos de los MPs sobre el crecimiento vegetal y sobre procesos asociados a los ciclos de macronutrientes, incluido el P. No obstante, la evidencia disponible sobre la relación entre MPs, disponibilidad de P y sostenibilidad de los sistemas agrícolas se encuentra dispersa, con diferencias entre enfoques experimentales, tipos de polímeros, dosis y condiciones edáficas evaluadas. En conjunto, la convergencia entre la creciente contaminación por microplásticos y la sensibilidad del ciclo del P plantea la interrogante: ¿cómo influyen los MPs en la disponibilidad, transformación y eficiencia del P en suelos agrícolas? A partir de esta pregunta, la presente revisión tiene como objetivo analizar y sistematizar la evidencia científica disponible sobre los efectos de los MPs en la dinámica del P en suelos agrícolas, considerando los principales mecanismos fisicoquímicos y biológicos involucrados, así como sus implicancias para la fertilidad del suelo y la sostenibilidad de los agroecosistemas.

Metodología

La presente investigación se desarrolló como una revisión sistemática de la literatura científica, siguiendo los lineamientos generales establecidos por la declaración PRISMA [Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses] (Page et al., 2021), con el objetivo de analizar de manera integrada la evidencia

disponible sobre los efectos de los microplásticos (MPs) en la dinámica del fósforo (P) en suelos, considerando los mecanismos de interacción biogeoquímica y sus implicancias para la fertilidad y la sostenibilidad agrícola.

La búsqueda bibliográfica se realizó exclusivamente en la base de datos Scopus (Elsevier), seleccionada por su amplia cobertura de literatura científica revisada por pares en las áreas de ciencias del suelo, ciencias ambientales y agronomía (Falagas et al., 2008). La estrategia de búsqueda se aplicó en los campos título, resumen y palabras clave (TITLE-ABS-KEY), utilizando combinaciones de términos relacionados con microplásticos, fósforo y suelos agrícolas, junto con operadores booleanos y comodines, con el fin de maximizar la recuperación de estudios relevantes (Gusenbauer & Haddaway, 2020). Entre los términos empleados se incluyeron “microplastic*”, “nanoplastic*”, “phosphorus”, “phosphate*”, “P availability”, “soil*” y “agricultural soil*”. La búsqueda se realizó en julio de 2025 y no se aplicó restricción temporal por año de publicación, con el propósito de recuperar la totalidad de la evidencia disponible en Scopus hasta esa fecha. Se consideraron únicamente artículos publicados en inglés, revisados por pares y relacionados con ciencias ambientales, ciencias del suelo, agricultura y ciencias biológicas. La ecuación de búsqueda utilizada en Scopus fue la siguiente: *TITLE-ABS-KEY ((microplastic OR nanoplastic) AND (phosphorus OR phosphate* OR “P availability” OR “phosphorus availability”) AND (soil* OR “agricultural soil*” OR farmland OR cropland)) ***. Se aplicaron filtros para incluir documentos revisados por pares, correspondientes a artículos científicos originales, publicados en inglés o español, dentro de áreas relacionadas con ciencias ambientales, ciencias del suelo, agricultura y ciencias biológicas. ** No se establecieron restricciones temporales estrictas, de modo de abarcar la totalidad de la evidencia disponible hasta la fecha de realización de la búsqueda.

Los registros obtenidos fueron exportados desde Scopus en formato compatible con gestores bibliográficos y se procedió a la eliminación de duplicados. Posteriormente, los estudios fueron sometidos a un proceso de selección en dos etapas. En primer lugar, se efectuó un cribado inicial a partir de los títulos y resúmenes, con el fin de identificar aquellos trabajos potencialmente pertinentes para los objetivos de la revisión. En una segunda etapa, los textos completos de los artículos seleccionados fueron evaluados en detalle para confirmar su elegibilidad final (Page et al., 2021). El proceso de selección consideró la identificación inicial de 394 registros, de los cuales 153 fueron seleccionados para evaluación en texto completo tras la revisión de títulos y resúmenes. Posteriormente, 92 artículos fueron excluidos durante la lectura completa por no cumplir con los criterios de inclusión definidos, resultando en 61 estudios incluidos en la síntesis cualitativa.

Se incluyeron estudios originales revisados por pares que evaluaron la presencia de MPs y/o nanoplásticos en suelos, con énfasis en suelos agrícolas o sistemas con relevancia agronómica, y que abordaran explícitamente variables asociadas a la dinámica del fósforo, tales como disponibilidad, fraccionamiento, procesos de adsorción y desorción, mineralización, actividad fosfatasa, solubilización microbiana o eficiencia del uso de fertilizantes fosfatados. Se consideraron estudios experimentales de laboratorio, ensayos en macetas, columnas de suelo, microcosmos y estudios de campo. Se excluyeron investigaciones realizadas exclusivamente en ambientes acuáticos o sedimentos, estudios que no evaluaran variables relacionadas con el fósforo, así como editoriales, notas técnicas y otros documentos que no presentaran datos experimentales

originales. También se excluyeron revisiones narrativas, capítulos de libro, resúmenes de congreso y documentos sin información metodológica suficiente para evaluar su relación con la dinámica del P en suelos.

Con el fin de fortalecer la interpretación de la evidencia recopilada, se llevó a cabo una evaluación cualitativa de la calidad metodológica de los estudios incluidos, considerando aspectos como la caracterización de los MPs, la justificación de las dosis empleadas, la presencia de controles y replicación experimental, la claridad en los métodos de análisis del P y el control de variables edáficas relevantes. Cada estudio fue revisado considerando cinco criterios: i) descripción del tipo, tamaño y forma de los MPs; ii) justificación de la dosis o concentración utilizada; iii) presencia de tratamiento control y replicación experimental; iv) descripción clara de los métodos empleados para evaluar variables asociadas al P; y v) consideración de propiedades edáficas relevantes para interpretar la disponibilidad de P, como pH, materia orgánica, textura o características químicas del suelo. A partir de estos criterios, los estudios fueron clasificados cualitativamente según su robustez metodológica general, con el propósito de identificar fortalezas, limitaciones y fuentes potenciales de heterogeneidad en la evidencia sintetizada. Finalmente, la información fue sintetizada de manera narrativa, organizando los resultados en función de los mecanismos fisicoquímicos y biológicos mediante los cuales los MPs pueden influir en la dinámica del fósforo en el suelo, así como de sus implicancias para la fertilidad y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (Page et al., 2021).

Resultados

Se identificaron 394 artículos, de los cuales 153 fueron seleccionados para evaluación en texto completo tras la revisión de títulos y resúmenes; posteriormente, 92 artículos fueron excluidos durante la lectura completa por no cumplir con los criterios de inclusión definidos, resultando en un total de 61 artículos finalmente incluidos en la síntesis cualitativa (Figura 1). Los estudios incluidos evidenciaron que los microplásticos pueden afectar directa e indirectamente la dinámica del P en suelos agrícolas. Específicamente, la presencia de microplásticos en el suelo se asoció con modificaciones en la disponibilidad de P, en sus fracciones lábiles y en los procesos biológicos vinculados a su ciclo, particularmente aquellos mediados por la actividad microbiana.

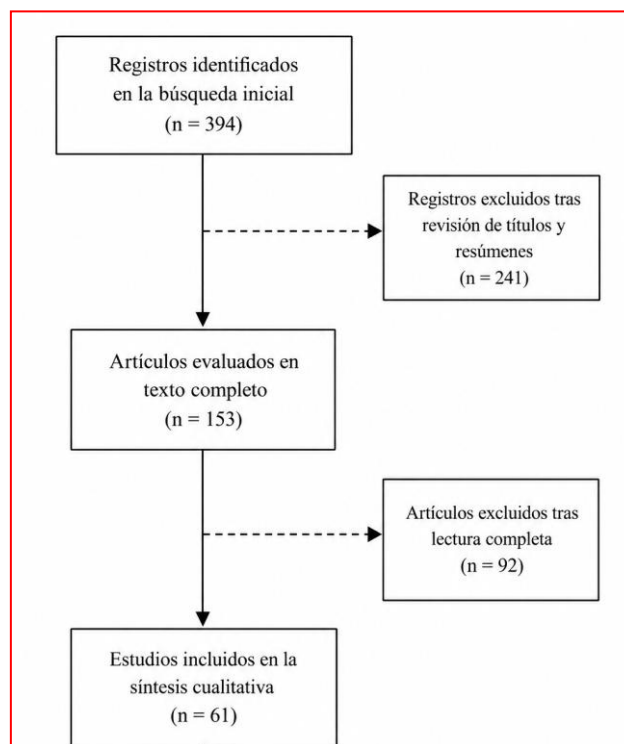


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de selección de los estudios incluidos en la revisión, indicando el número de registros identificados, evaluados y excluidos en cada etapa, hasta la inclusión final de 61 artículos en la síntesis cualitativa. Fuente: Elaboración propia.

La síntesis de estudios seleccionados (Tabla 1), demostró que la mayor proporción correspondió a ensayos de incubación en suelo, los cuales representan aproximadamente el 30 % del total, seguidos por experimentos en maceta (suelo-planta), que concentran cerca del 30 % de los estudios. En menor proporción se identificaron estudios de campo asociados al uso de acolchado plástico, que representaron alrededor del 10 %, mientras que, los enfoques de microcosmos, estudios fisiológicos en plantas y evaluaciones con microplásticos envejecidos o biodegradables en conjunto aportaron aproximadamente un 20 %. Finalmente, las revisiones sistemáticas y críticas representaron menos del 10 % de los estudios incluidos. En conjunto, estos trabajos abarcan amplia diversidad de polímeros y condiciones experimentales, y evaluaron variables del fósforo relacionadas tanto con su disponibilidad como con procesos biológicos asociados a su ciclo.

Tabla 1. Características generales de los estudios incluidos que evalúan los efectos de los microplásticos sobre variables asociadas al fósforo en suelos.

Tipo de estudio	Sistema / cultivo	Tipo de microplásticos	Variables evaluadas	Dirección general del efecto	Referencias
Campo	Arrozales, suelos agrícolas, Andisoles	Films agrícolas degradados, MPs mixtos	Nutrientes del suelo, microbiología, enzimas	↓	Jiang et al., 2023; Shi et al., 2022; Shi et al., 2023
Columna / transporte	Sistemas porosos, medios saturados	PET, MPs, nano-MPs	Transporte, movilidad, interacción fisicoquímica	redistribución	Fu & Yang, 2025
Incubación	Suelos agrícolas	PE, PS, PP, PVC, PLA, MPs mixtos	Enzimas, microbioma, nutrientes del suelo	↓ / ↑ dependiente de condiciones	Hou et al., 2021; Cruz et al., 2024; Song et al., 2024; Qiu et al., 2023; Cheng et al., 2024; Dindar, 2025; Palansooriya et al., 2024; Li & Liu, 2022; Xu et al., 2025b
Maceta	Hortalizas, cultivos extensivos, leguminosas, arroz	PE, PS, PP, PVC, PLA, MPs biodegradables	Nutrientes, absorción, biomasa, enzimas	↓ / ↑ según polímero y dosis	Zhang et al., 2025; Duan et al., 2024; Xu et al., 2025a; Yu et al., 2023; Pinto-Poblete et al., 2023; Wasnik et al., 2026; Yang et al., 2021; Palansooriya et al., 2024; Wang et al., 2024b; Wang et al., 2025b; Wang et al., 2025c
Suelo-planta (diseño no especificado)	Agroecosistemas, cultivos agrícolas	MPs mixtos, PE, PS, PLA	Nutrientes, microbiología, crecimiento vegetal	↓ predominante	Yue et al., 2026; Fan et al., 2025; Zhao et al., 2025; Sahasa et al., 2023; Dong et al., 2021; Shorobi et al., 2023; Zhang et al., 2024b; Li et al., 2024a; Lin et al., 2025; Riveros et al., 2025; Li et al., 2024b; Erdem et al., 2025; Suazo-Hernández et al., 2025; Zhang et al., 2022; Zhuang et al., 2024; Meng et al., 2026; Liu et al., 2024; Jin et al., 2026; Shi et al., 2025; Zhang et al., 2024c; Sun et al., 2025
Experimental / otros diseños	Sistemas agrícolas y experimentales	MPs mixtos, nano-MPs, MPs envejecidos	Biogeoquímica, microbioma, nutrientes	↓ / redistribución	Wang et al., 2025a; Xiong et al., 2025; Wu et al., 2024; Li et al., 2023; Zhang et al., 2024a; Zhang et al., 2023; Yang et al., 2021; Wang et al., 2024a; Zhang et al., 2026; Cai et al., 2026; Mai et al., 2023; Feng et al., 2024; Jamtsho et al., 2024; Ma et al., 2023; Golia & Liava, 2024; Liu et al., 2025

Nota. MPs = microplásticos; PET = tereftalato de polietileno; PE = polietileno; PS = poliestireno; PP = polipropileno; PVC = policloruro de vinilo; PLA = ácido poliláctico. La flecha hacia arriba indica aumento del efecto, mientras que la flecha hacia abajo indica disminución del efecto. Fuente: Elaboración propia.

A partir de la evidencia sintetizada, se identificaron distintas rutas mediante las cuales los MPs pueden modificar la dinámica del P en suelos agrícolas. Estas rutas incluyen cambios en la estructura y porosidad del suelo, alteraciones en los procesos de adsorción y desorción de fosfato, modificaciones del pH, variaciones en la actividad fosfatasa y cambios en las comunidades microbianas relacionadas con la mineralización y solubilización del P (Figura 2).

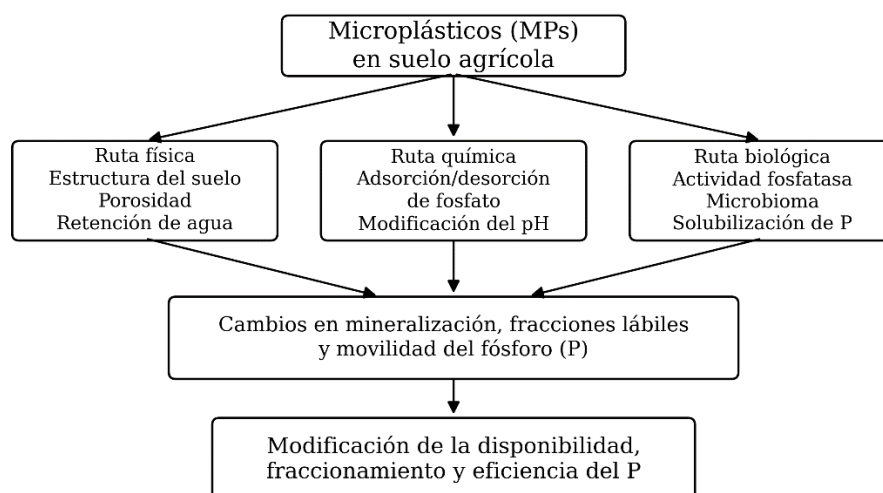


Figura 2. Esquema conceptual de los principales mecanismos mediante los cuales los microplásticos pueden influir en la dinámica del fósforo en suelos agrícolas. Fuente: Elaboración propia.

Discusión

Los resultados de esta revisión evidenciaron que la interacción entre microplásticos (MPs) y la dinámica del fósforo (P) en suelos constituye un tema emergente, con ausencia de estudios anteriores a 2017 e incremento sostenido de publicaciones a partir de 2019, lo que refleja un campo de investigación aún en consolidación. La sistematización de la evidencia demostró un predominio de ensayos de incubación de suelo y experimentos en maceta, lo que indica que el conocimiento actual se encuentra en una etapa inicial de desarrollo, fuertemente basada en condiciones experimentales controladas (Li et al., 2024a; Wang et al., 2024a). En términos generales, se observó que la presencia de microplásticos en el suelo se asoció mayoritariamente con una disminución de la disponibilidad de P, aunque la magnitud y dirección del efecto dependen del tipo de polímero, la dosis, el tamaño de partícula y las propiedades del suelo (Liu et al., 2024; Wang et al., 2024b). Esta información es particularmente relevante considerando que tanto los MPs como el P actúan como moduladores de la productividad de los sistemas agrícolas y de la seguridad alimentaria (Meng et al., 2026). No obstante, la evidencia disponible debe interpretarse con cautela, ya que la predominancia de estudios bajo condiciones controladas limita la posibilidad de establecer respuestas generalizables para todos los agroecosistemas. En este sentido, más que confirmar una respuesta única de la dinámica del P frente a los MPs, la literatura disponible sugiere un patrón dependiente del contexto experimental, del tipo de partícula plástica y de las propiedades edáficas evaluadas.

El estudio demostró que hubo un predominio de ensayos de incubación en suelo y experimentos en maceta, representando más de la mitad de la evidencia disponible. Esta situación puede asociarse a que gran parte del conocimiento sobre los efectos de los MPs en la dinámica del P proviene de condiciones controladas, donde variables como el tipo de polímero, la dosis y el tamaño de partícula pueden aislarse con mayor facilidad (Zhang et al., 2024a; Li et al., 2024b; Wang et al., 2024a). Sin embargo, la baja proporción de estudios de campo limita la extrapolación a sistemas agrícolas reales, caracterizados por una mayor heterogeneidad

edáfica, climática y de manejo (Meng et al., 2026; Riveros et al., 2025). Asimismo, la baja fracción de estudios fisiológicos de plantas confirma una brecha de conocimiento relevante sobre los mecanismos y efectos inducidos por la interacción entre MPs y la deficiencia de P del suelo (Jin et al., 2026; Wasnik et al., 2026). Esta distribución de estudios muestra una debilidad importante de la evidencia actual, ya que los ensayos de incubación y maceta permiten identificar mecanismos específicos, pero no siempre reproducen la complejidad de los sistemas agrícolas productivos (Zhang et al., 2024a; Li et al., 2024b; Wang et al., 2024a). En condiciones de campo, factores como la estacionalidad, la textura del suelo, el historial de fertilización, la actividad radical, la humedad, la temperatura y la mezcla de polímeros pueden modificar la magnitud e incluso la dirección de los efectos observados sobre el P (Meng et al., 2026; Riveros et al., 2025). Por ello, los resultados obtenidos en condiciones controladas deben ser considerados como una base mecanística, más que como una representación directa del comportamiento de los MPs en sistemas agrícolas reales.

Los MPs en el suelo se asociaron de forma consistente con una disminución de la disponibilidad de P y de sus fracciones lábiles. En particular, los estudios de incubación mostraron que los MPs pueden modificar los procesos de adsorción y desorción del P, posiblemente a través de cambios en la superficie reactiva del suelo, la alteración de la agregación y la redistribución de sitios de fijación asociados a óxidos de Fe, Al o Ca (Li et al., 2024a; Zhang et al., 2024b; Cai et al., 2026). Los microplásticos influyen en la dinámica del P del suelo mediante diversos mecanismos fisicoquímicos. Uno de los mecanismos más reportados corresponde a la modificación de las propiedades físicas del suelo, particularmente la agregación, la porosidad y la distribución del tamaño de poros (Zhang et al., 2024c; Zhao et al., 2025). Estas alteraciones afectan la difusión del P en la solución del suelo y su contacto con superficies reactivas, modificando los procesos de adsorción y desorción que regulan su disponibilidad (Li et al., 2024a; Cai et al., 2026). Adicionalmente, los MPs pueden actuar como superficies sólidas adicionales dentro de la matriz del suelo, generando nuevos sitios de interacción físico-química (Cai et al., 2026).

También se ha demostrado que el tipo de MPs (tipo de polímero, dosis y tamaño de partícula) condiciona la absorción y disponibilidad del P. Por ejemplo, polímeros convencionales como polietileno y polipropileno mostraron efectos predominantemente negativos sobre la disponibilidad de P, mientras que los microplásticos biodegradables presentaron respuestas más variables (Li et al., 2024b; Zhang et al., 2024c; Liu et al., 2024). Asimismo, los MPs envejecidos o foto-oxidativos presentan superficies más reactivas que pueden interactuar con especies fosfatadas, contribuyendo a su inmovilización o a cambios en el equilibrio entre fracciones orgánicas e inorgánicas del P (Zhang et al., 2024b). De igual forma, la presencia de MPs puede modificar parámetros fisicoquímicos del suelo como el pH y la capacidad de intercambio catiónico, factores que controlan directamente la solubilidad y especiación del P (Zhang et al., 2026; Meng et al., 2026). En conjunto, estos mecanismos fisicoquímicos explican la tendencia general hacia una disminución del P disponible reportada en la mayoría de los estudios analizados. Sin embargo, la evidencia también muestra respuestas contrastantes, especialmente cuando se comparan polímeros convencionales, biodegradables y partículas envejecidas (Li et al., 2024b; Zhang et al., 2024b; Zhang et al., 2024c; Liu et al., 2024). Estas diferencias sugieren que no todos los MPs ejercen el mismo efecto sobre la dinámica del P. Mientras algunos polímeros podrían reducir la disponibilidad de P mediante inmovilización, modificación del pH o alteración de superficies reactivas, otros podrían generar respuestas transitorias asociadas a la degradación del material, la liberación de compuestos orgánicos o la estimulación temporal de la actividad

microbiana (Li et al., 2024b; Zhang et al., 2024c). Esta contradicción aparente no invalida la tendencia general observada, sino que demuestra que la respuesta del P frente a los MPs es altamente dependiente de la composición química del polímero, su grado de envejecimiento y el tiempo de exposición en el suelo (Zhang et al., 2024b; Liu et al., 2024).

Página | 11

Desde una perspectiva biológica, se ha demostrado que los microplásticos afectan el ciclo del P principalmente a través de la alteración del microbioma del suelo y de la actividad enzimática asociada a la mineralización del P orgánico (Liu et al., 2024a; Zhang et al., 2024a; Qiu et al., 2023). Una proporción significativa de los estudios enfatizó el rol de los MPs en la alteración de procesos biológicos del ciclo del P. Por ejemplo, se ha documentado una disminución generalizada de la actividad fosfatasa ácida y alcalina del suelo, lo cual indica una menor mineralización del P orgánico como consecuencia de cambios en la composición y actividad del microbioma (Wang et al., 2024b; Zhang et al., 2026; Meng et al., 2026). Estos efectos pueden explicarse por cambios en el microhábitat del suelo inducidos por los MPs, incluyendo modificaciones en la disponibilidad de carbono, la aireación del suelo y la distribución espacial de los microorganismos (Jin et al., 2026; Zhang et al., 2024a). Además, los MPs y sus aditivos, así como su interacción con otros contaminantes, alteran las propiedades fisicoquímicas del suelo que condicionan el microhábitat microbiano, afectando la actividad y biomasa de las comunidades del suelo (Wasnik et al., 2026). La liberación de aditivos plásticos genera estrés fisiológico en comunidades microbianas, afectando bacterias solubilizadoras de fosfato y hongos micorrícicos (Yue et al., 2026; Zhang et al., 2026). Estos resultados refuerzan la idea de que los efectos de los MPs sobre el P no pueden explicarse únicamente desde una perspectiva química, ya que una parte importante de la disponibilidad de este nutriente depende de procesos biológicos mediados por enzimas y microorganismos (Liu et al., 2024a; Zhang et al., 2024a; Qiu et al., 2023).

La disminución de la actividad fosfatasa puede reducir la mineralización del P orgánico, mientras que los cambios en bacterias solubilizadoras de fosfato y hongos micorrícicos podrían afectar la transformación y adquisición del P por las plantas (Wang et al., 2024b; Zhang et al., 2026; Meng et al., 2026; Yue et al., 2026). No obstante, la respuesta biológica también puede ser variable, debido a que algunos MPs pueden generar nuevos microhábitats o modificar la disponibilidad de carbono, lo que en determinados contextos podría favorecer temporalmente ciertos grupos microbianos (Jin et al., 2026; Zhang et al., 2024a). Por ello, la relación entre MPs, microbioma y P debe entenderse como una respuesta dinámica, donde coexisten efectos negativos predominantes y respuestas compensatorias dependientes del sistema evaluado.

Asimismo, se ha demostrado que los MPs combinados con metales pesados generan efectos negativos sinérgicos sobre la absorción del P y su disponibilidad en el suelo (Wasnik et al., 2026). En el caso de los MPs biodegradables, las respuestas del P han sido contrastantes y dependientes del tipo de material y del tiempo de incubación. Mientras algunos polímeros biodegradables pueden estimular transitoriamente la actividad microbiana y la liberación de P, otros generan efectos negativos similares a los observados con plásticos convencionales (Li et al., 2024b; Zhang et al., 2024c). Por ello, los MPs biodegradables no necesariamente aumentan la fertilidad fosfatada del suelo, y su comportamiento debe evaluarse considerando su composición química y sus productos de degradación. Esta evidencia es particularmente relevante para la sostenibilidad agrícola, ya que los suelos productivos rara vez están expuestos a un único factor de estrés. La

interacción entre MPs, metales pesados, fertilizantes, materia orgánica y condiciones edáficas puede intensificar o modificar los efectos sobre la disponibilidad de P (Wasnik et al., 2026; Li et al., 2024b; Zhang et al., 2024c). En consecuencia, el reemplazo de plásticos convencionales por materiales biodegradables no debe asumirse automáticamente como una solución sin impactos sobre la fertilidad del suelo (Li et al., 2024b; Zhang et al., 2024c). La evaluación de estos materiales debe considerar no solo su degradabilidad, sino también sus efectos sobre la actividad microbiana, las enzimas del ciclo del P y la posible liberación de subproductos durante su transformación en el suelo (Wang et al., 2024b; Zhang et al., 2026; Yue et al., 2026).

En conjunto, los mecanismos identificados permiten proponer un modelo conceptual en el que los MPs modifican la dinámica del P mediante rutas físicas, químicas y biológicas interrelacionadas (Li et al., 2024a; Cai et al., 2026; Zhang et al., 2024a; Zhang et al., 2026). La ruta física incluye cambios en agregación, estructura, porosidad y movilidad del agua (Zhang et al., 2024c; Zhao et al., 2025); la ruta química considera modificaciones del pH, sitios de adsorción/desorción y superficies reactivas (Li et al., 2024a; Cai et al., 2026; Meng et al., 2026); mientras que la ruta biológica integra cambios en actividad fosfatasa, microbioma, bacterias solubilizadoras de fosfato y hongos micorrícicos (Wang et al., 2024b; Zhang et al., 2026; Yue et al., 2026). Estas rutas no actúan de manera aislada, sino que se relacionan entre sí y pueden modificar la disponibilidad, el fraccionamiento y la eficiencia del P en suelos agrícolas. Este enfoque mecanístico permite sintetizar la evidencia disponible y facilita la identificación de procesos clave que deberían ser priorizados en estudios futuros.

Pese a los avances identificados, esta revisión presenta limitaciones que deben ser consideradas. En primer lugar, la búsqueda bibliográfica se realizó exclusivamente en Scopus, lo que pudo excluir estudios disponibles en otras bases de datos científicas (Falagas et al., 2008; Gusenbauer & Haddaway, 2020). En segundo lugar, la evidencia sintetizada estuvo dominada por ensayos de incubación, maceta y microcosmos, por lo que la extrapolación de los resultados a condiciones de campo debe realizarse con prudencia (Zhang et al., 2024a; Li et al., 2024b; Wang et al., 2024a; Meng et al., 2026; Riveros et al., 2025). En tercer lugar, los estudios incluidos presentaron una alta heterogeneidad metodológica, especialmente en relación con el tipo de polímero, tamaño de partícula, dosis aplicada, duración experimental, tipo de suelo y variables utilizadas para evaluar la disponibilidad de P (Li et al., 2024b; Zhang et al., 2024c; Liu et al., 2024; Zhang et al., 2024b). Finalmente, la limitada disponibilidad de estudios de largo plazo y de experimentos bajo condiciones agrícolas reales dificulta establecer conclusiones definitivas sobre el impacto acumulativo de los MPs en la fertilidad fosfatada del suelo (Meng et al., 2026; Riveros et al., 2025). Estas limitaciones no disminuyen la relevancia de la evidencia recopilada, pero sí refuerzan la necesidad de interpretar los resultados desde una perspectiva crítica y dependiente del contexto.

Este estudio demostró que los MPs constituyen un modulador relevante de la dinámica del P en suelos agrícolas. Dado que el P es uno de los principales nutrientes limitantes en la agricultura (Meng et al., 2026), cualquier factor que reduzca su disponibilidad efectiva adquiere alta relevancia en términos de seguridad alimentaria y sostenibilidad de los sistemas productivos. Sin embargo, persisten vacíos de conocimiento importantes, particularmente en estudios de largo plazo, evaluaciones a escala de campo y enfoques integrados suelo-planta. Asimismo, se requieren nuevas investigaciones que evalúen distintas

concentraciones de MPs, combinaciones de polímeros y condiciones edafoclimáticas contrastantes, con el fin de comprender de forma más robusta el impacto real de los microplásticos sobre la fertilidad fosfatada y la sostenibilidad de los agroecosistemas. Futuras investigaciones deberían avanzar hacia diseños experimentales comparables, con criterios metodológicos estandarizados, mayor representación de sistemas de campo y evaluación simultánea de variables químicas, físicas, biológicas y fisiológicas. De esta manera, será posible diferenciar con mayor precisión los efectos directos de los MPs sobre las fracciones de P de aquellos efectos indirectos mediados por cambios en el suelo, el microbioma y la respuesta de las plantas.

Conclusiones

La revisión de literatura demostró que las investigaciones sobre los efectos de los microplásticos en la disponibilidad del P son recientes y se encuentran dominadas por estudios experimentales en condiciones controladas, con una limitada representación de ensayos de campo y enfoques integrados suelo-planta. La evidencia analizada indica que los microplásticos influyen en la dinámica del P en suelos agrícolas, afectando principalmente sus procesos biológicos, su disponibilidad y su fraccionamiento. La mayoría de los estudios reportó efectos negativos de los microplásticos sobre el P disponible, aunque estas respuestas estuvieron moduladas por el tipo de polímero, la dosis, el tamaño de partícula y el sistema evaluado. Comprender y cuantificar estos efectos resulta fundamental para el diseño de estrategias de manejo del P.

Los estudios demostraron que los microplásticos afectaron la disponibilidad y el fraccionamiento del P mediante mecanismos fisicoquímicos, tales como la modificación de la estructura del suelo, la alteración de superficies reactivas y la interacción directa con especies fosfatadas, así como a través de mecanismos biológicos asociados a cambios en el microbioma del suelo y la disminución de la actividad fosfatasa. Estos efectos posicionan a los microplásticos como un factor de presión adicional sobre la fertilidad del P en suelos agrícolas, con implicancias potenciales para la eficiencia del uso de fertilizantes, la productividad vegetal y la sostenibilidad de los sistemas productivos. Abordar estos efectos es fundamental para el diseño de estrategias de manejo del suelo y del P que consideren este contaminante emergente en un contexto de creciente demanda por seguridad alimentaria y sostenibilidad agrícola.

Futuras investigaciones deben avanzar hacia estudios de campo, evaluaciones de largo plazo y diseños experimentales comparables, que consideren distintas concentraciones de MPs, combinaciones de polímeros y condiciones edafoclimáticas contrastantes. Esto permitirá comprender con mayor precisión el impacto acumulativo de los microplásticos sobre la fertilidad fosfatada y la sostenibilidad de los agroecosistemas.

Conflicto de Intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Aminzadeh, M.; Kokate, T.; Chaudhry, A. U.; Rabbani, H.; Bijeljic, B.; Blunt, M. J. & Shokri, N. (2025). Microplastic-induced alterations in water flow and solute transport dynamics in soil. *Scientific Reports*, 15, 42941. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-30476-6>
- Aralappanavar, V. K.; Mukhopadhyay, R.; Yu, Y.; Liu, J.; Bhatnagar, A.; Praveena, S. M.; Li, Y.; Paller, M.; Adyel, T. M.; Rinklebe, J.; Bolan, N. S. & Sarkar, B. (2024). Effects of microplastics on soil microorganisms and microbial functions in nutrients and carbon cycling: A review. *Science of the Total Environment*, 924, 171435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171435>
- Balemi, T. & Negisho, K. (2012). Management of soil phosphorus and plant adaptation mechanisms to phosphorus stress for sustainable crop production: A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12(3), 547–562. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162012005000015>
- Brownlie, W. J.; Alexander, P.; Cordell, D.; Maslin, M.; Metson, G. S.; Sutton, M. A. & Spears, B. M. (2024). National phosphorus planning for food and environmental security. *Current Opinion in Biotechnology*, 90, 103226. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2024.103226>
- Cai, Y.; Li, Q.; Wu, M.; Chen, M.; Li, H. & Hao, Y. (2026). Impact of fertilizers on polyethylene terephthalate nanoplastics migration in groundwater: A combined experimental and simulation approach. *Water Research*, 291, 125275. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.125275>
- Chaudhary, H. D.; Shah, G.; Bhatt, U.; Singh, H. & Soni, V. (2025). Microplastics and plant health: A comprehensive review of sources, distribution, toxicity, and remediation. *npj Emerging Contaminants*, 1, 8. <https://doi.org/10.1038/s44454-025-00007-z>
- Cheng, Y.; Guo, Y.; Wang, F. & Zhang, L. (2024). Effects of polyethylene microplastics stress on soil physicochemical properties mediated by earthworm *Eisenia fetida*. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(8), 12071–12082. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32007-8>
- Cheng, Y.; Wang, F.; Huang, W. & Liu, Y. (2024). Response of soil biochemical properties and ecosystem function to microplastics pollution. *Scientific Reports*, 14, 28328. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80124-8>
- Cruz, L. G.; Shen, F.-T.; Chen, C.-P. & Chen, W.-C. (2024). Dose effect of polyethylene microplastics derived from commercial resins on soil properties, bacterial communities, and enzymatic activity. *Microorganisms*, 12(9), 1790. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12091790>
- Cusworth, S. J.; Davies, W. J.; McAinsh, M. R.; Gregory, A. S.; Storkey, J. & Stevens, C. J. (2024). Agricultural fertilisers contribute substantially to microplastic concentrations in UK soils. *Communications Earth & Environment*, 5, 7. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01172-y>
- Dindar, E. (2025). Impact of microplastic contamination on phosphorus availability, alkaline phosphatase activity, and polymer degradation in soil. *Polymers*, 17(12), 1586. <https://doi.org/10.3390/polym17121586>
- Dong, Y.; Gao, M.; Qiu, W. & Song, Z. (2021). Effect of microplastics and arsenic on nutrients and microorganisms in rice rhizosphere soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 211, 111899. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111899>
- Duan, L.-Y.; Zhang, Y.; Li, Y.-Y.; Li, X.-Q.; Liu, Y.-Q.; Li, B. L.; Ding, C.-Y.; Ren, X.-M.; Duan, P.-F.; Han, H. & Chen, Z.-J. (2024). Effects of combined microplastic and cadmium pollution on sorghum

- growth, Cd accumulation, and rhizosphere microbial functions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 277, 116380. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116380>
- Erdem, H.; Gence, C. Ç.; Öztürk, M.; Buhan, E.; Kholikulov, S. T. & Kaya, Y. (2025). Microplastics in soil increase cadmium toxicity: Implications for plant growth and nutrient imbalance. *Water, Air, & Soil Pollution*, 236(9), 575. <https://doi.org/10.1007/s11270-025-08222-5>
- Falagas, M. E.; Pitsouni, E. I.; Malietzis, G. A. & Pappas, G. (2008). Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar: Strengths and weaknesses. *The FASEB Journal*, 22(2), 338–342. <https://doi.org/10.1096/fj.07-9492LSF>
- Fan, H.; Hong, X.; Wang, H.; Gao, F.; Su, Z. & Yao, H. (2025). Biodegradable microplastics affect tomato (*Solanum lycopersicum* L.) growth by interfering rhizosphere key phylotypes. *Journal of Hazardous Materials*, 487, 137208. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.137208>
- Feng, Z.; Zhu, N.; Wu, H.; Li, M.; Chen, J.; Yuan, X.; Li, J. & Wang, Y. (2024). Microplastic coupled with soil dissolved organic matter mediated changes in the soil chemical and microbial characteristics. *Chemosphere*, 359, 142361. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142361>
- Fu, Y. & Yang, J. (2025). Effects of microplastics migration on farmland soil physical and chemical properties under leaching conditions. *Water, Air, & Soil Pollution*, 236(1), 40. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07690-5>
- Golia, E. E. & Liava, V. (2024). The use of geotextiles in agricultural soils and their effects on soil properties and nutrients availability. Are wastes plastics likely to become useful materials in agriculture? *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 39, 101544. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101544>
- Gusenbauer, M. & Haddaway, N. R. (2020). Which academic search systems are suitable for systematic reviews or meta-analyses? Evaluating retrieval qualities of Google Scholar, PubMed, and 26 other resources. *Research Synthesis Methods*, 11(2), 181–217. <https://doi.org/10.1002/jrsm.1378>
- Hou, J.; Xu, X.; Yu, H.; Xi, B. & Tan, W. (2021). Comparing the long-term responses of soil microbial structures and diversities to polyethylene microplastics in different aggregate fractions. *Environment International*, 149, 106398. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106398>
- Ibrahim, N.; Rahman, A. M. N. A. A.; Shafiq, M. D.; Lockman, Z.; Jaafar, M. & Kameda, Y. (2025). Microplastic pollution: Sources, degradation mechanisms, analytical advances, and mitigation strategies for environmental sustainability. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 263, 18. <https://doi.org/10.1007/s44169-025-00098-0>
- Jahan, N.; Mahmud, U. & Khan, M. Z. (2025). Sustainable plant-soil phosphorus management in agricultural systems: Challenges, environmental impacts and innovative solutions. *Discover Soil*, 2, 13. <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00039-2>
- Jamtsho, K.; Lund, M. A.; Blake, D. & Van Etten, E. (2024). Microplastic pollution in riparian soils of the rapidly growing city of Thimphu, Bhutan. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235(11), 714. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07536-0>
- Jiang, Y.; Zhu, X.; Zhang, S.; Yang, J.; Lu, Y. & Wang, Y. (2023). Impact of microplastics on the in situ, high-resolution of key nutrient dynamics at the soil-water interface in rice fields. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1239282. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1239282>

- Jin, W.; Zhang, Y.; Li, Y.; Li, R.; Su, X.; Jing, S.; Wang, R.; Qiu, Y.; Xie, X.; Guo, Z. & Zhao, X. (2026). Polyethylene microplastics induce microbial functional reprogramming via rhizosphere network disruption, accelerating soil decline. *Journal of Environmental Management*, 397, 128236. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.128236>
- Lan, G.; Huang, X.; Li, T.; Huang, Y.; Liao, Y.; Zheng, Q.; Zhao, Q.; Yu, Y. & Lin, J. (2025). Effect of microplastics on carbon, nitrogen and phosphorus cycle in farmland soil: A meta-analysis. *Environmental Pollution*, 370, 125871. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.125871>
- Li, G.; Cai, L. & Liu, Y. (2023). Different effects of conventional and biodegradable microplastics on the amelioration process of cadmium-contaminated soil. *Science of The Total Environment*, 892, 164589. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164589>
- Li, H. & Liu, L. (2022). Short-term effects of polyethene and polypropylene microplastics on soil phosphorus and nitrogen availability. *Chemosphere*, 291, 132984. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132984>
- Li, Q.; Yan, J.; Li, Y.; Liu, Y.; Andom, O. & Li, Z. (2024). Microplastics alter cadmium accumulation in different soil-plant systems: Revealing the crucial roles of soil bacteria and metabolism. *Journal of Hazardous Materials*, 474, 134768. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134768>
- Li, Y.; Shi, X.; Qin, P.; Zeng, M.; Fu, M.; Chen, Y.; Qin, Z.; Wu, Y.; Liang, J.; Chen, S. & Yu, F. (2024). Effects of polyethylene microplastics and heavy metals on soil-plant microbial dynamics. *Environmental Pollution*, 341, 123000. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123000>
- Lin, B.; Fan, Q.; Liu, F.; Wang, L.; Wei, C.; Liu, B.; Zhao, J.; Zuo, L. & Xie, Y. (2025). From biodegradation to biohazard: Polylactic acid microplastics induced rice growth inhibition in agroecosystems. *Journal of Hazardous Materials*, 496, 139420. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.139420>
- Liu, X.; Li, Y.; Yu, Y. & Yao, H. (2023). Effect of nonbiodegradable microplastics on soil respiration and enzyme activity: A meta-analysis. *Applied Soil Ecology*, 184, 104770. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104770>
- Liu, Z.; Wen, J.; Liu, Z.; Su, Z.; Wu, Z.; Shen, H.; Wei, H. & Zhang, J. (2025). Tire microplastics rather than polystyrene microplastics reduce soil microbial diversity and network complexity and stability, and induce microbial homogenization. *Journal of Hazardous Materials*, 495, 138945. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138945>
- Liu, Z.; Wen, J.; Liu, Z.; Wei, H. & Zhang, J. (2024). Polyethylene microplastics alter soil microbial community assembly and ecosystem multifunctionality. *Environment International*, 183, 108360. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108360>
- Ma, R.; Xu, Z.; Sun, J.; Li, D.; Cheng, Z.; Niu, Y.; Guo, H.; Zhou, J. & Wang, T. (2023). Microplastics affect C, N, and P cycling in natural environments: Highlighting the driver of soil hydraulic properties. *Journal of Hazardous Materials*, 459, 132326. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132326>
- Mai, H.; Thien, N. D.; Dung, N. T. & Valentin, C. (2023). Impacts of microplastics and heavy metals on the earthworm *Eisenia fetida* and on soil organic carbon, nitrogen, and phosphorus. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(23), 64576–64588. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27002-4>

- Masciarelli, E.; Casorri, L.; Di Luigi, M.; Beni, C.; Valentini, M.; Costantini, E.; Aielli, L. & Reale, M. (2025). Microplastics in agricultural crops and their possible impact on farmers' health: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 22(1), 45. <https://doi.org/10.3390/ijerph22010045>
- Meng, Z.; Lv, L.; Xu, J.; He, M. & Wei, Y. (2026). Nitrogen and phosphorus addition mitigates microplastic community impacts on coastal saline-alkaline wetland ecosystems. *Environmental Research*, 292, 123616. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.123616>
- Page, M. J.; McKenzie, J. E.; Bossuyt, P. M.; Boutron, I.; Hoffmann, T. C.; Mulrow, C. D.; Shamseer, L.; Tetzlaff, J. M.; Akl, E. A.; Brennan, S. E.; Chou, R.; Glanville, J.; Grimshaw, J. M.; Hróbjartsson, A.; Lalu, M. M.; Li, T.; Loder, E. W.; Mayo-Wilson, E.; McDonald, S.; McGuinness, L. A.; Stewart, L. A.; Thomas, J.; Tricco, A. C.; Welch, V. A.; Whiting, P.; Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *British Medical Journal*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Palansooriya, K. N.; Zhou, Y.; An, Z.; Cai, Y. & Chang, S. X. (2024). Microplastics affect the ecological stoichiometry of plant, soil and microbes in a greenhouse vegetable system. *Science of The Total Environment*, 924, 171602. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171602>
- Pinto-Poblete, A.; Retamal-Salgado, J.; Zapata, N.; Sierra-Almeida, A. & Schoebitz, M. (2023). Impact of polyethylene microplastics and copper nanoparticles: Responses of soil microbiological properties and strawberry growth. *Applied Soil Ecology*, 184, 104773. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104773>
- Qiu, G.; Wang, Q.; Wang, Q.; Wang, T.; Kang, Z.; Zeng, Y.; Yang, X.; Song, N.; Zhang, S.; Han, X. & Yu, H. (2023). Effects of polyethylene microplastics on properties, enzyme activities, and the succession of microbial community in Mollisol: At the aggregate level. *Environmental Research*, 237, 116976. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116976>
- Rashid, S.; Majeed, L. R.; Mehta, N.; Radu, T.; Martín-Fabiani, I. & Bhat, M. A. (2025). Microplastics in terrestrial ecosystems: Sources, transport, fate, mitigation, and remediation strategies. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 10, 2633–2659. <https://doi.org/10.1007/s41207-025-00766-6>
- Riveros, G.; López-Belchí, M. D.; Ortiz, J.; Bascuñan-Godoy, L. & Schoebitz, M. (2025). Microplastic pollution in Andisol: Effects on soil microbiology, nitrogen cycling, and *Raphanus sativus* L. growth. *Soil Use and Management*, 41(3), e70113. <https://doi.org/10.1111/sum.70113>
- Sahasa, R. G. K.; Dhevagi, P.; Poornima, R.; Ramya, A.; Karthikeyan, S. & Priyatharshini, S. (2023). Dose-dependent toxicity of polyethylene microplastics (PE-MPs) on physiological and biochemical response of blackgram and its associated rhizospheric soil properties. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(56), 119168–119186. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30550-4>
- Sakin, E.; Dilekoğlu, M. F. & Yanardağ, İ. H. (2025). Unseen threat: The devastating impact of microplastics on soil health in agricultural lands. *Catena*, 253, 108904. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108904>
- Shi, J.; Pan, X.; Zhang, W.; Dong, J.; Zhao, Y.; Ran, J.; Zhou, D.; Li, G. & Zheng, Z. (2025). Remediation of coastal wetland soils co-contaminated with microplastics and cadmium using *Spartina alterniflora*

- biochar: Soil quality, microbial communities, and plant growth responses. *Agronomy*, 15(4), 877. <https://doi.org/10.3390/agronomy15040877>
- Shi, L.; Chen, Z.; Hou, Y.; Li, J.; Shen, Z. & Chen, Y. (2023). The original polyethylene microplastics inhibit the growth of sweet potatoes and increase the safety risk of cadmium. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1138281. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1138281>
- Shi, L.; Hou, Y.; Chen, Z.; Bu, Y.; Zhang, X.; Shen, Z. & Chen, Y. (2022). Impact of polyethylene on soil physicochemical properties and characteristics of sweet potato growth and polyethylene absorption. *Chemosphere*, 302, 134734. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134734>
- Shorobi, F. M.; Vyavahare, G. D.; Seok, Y. J. & Park, J. H. (2023). Effect of polypropylene microplastics on seed germination and nutrient uptake of tomato and cherry tomato plants. *Chemosphere*, 329, 138679. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138679>
- Song, X.; Li, C.; Qiu, Z.; Wang, C. & Zeng, Q. (2024). Ecotoxicological effects of polyethylene microplastics and lead (Pb) on the biomass, activity, and community diversity of soil microbes. *Environmental Research*, 252, 119012. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119012>
- Suazo-Hernández, J.; Cáceres-Jensen, L.; Pesenti, H.; Corradini, F.; De La Luz Mora, M.; Bolan, N.; Cornejo, P. & Sarkar, B. (2025). Microplastics influence phosphate adsorption in volcanic ash soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 25(3), 5494–5507. <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02472-2>
- Sun, M.; Li, X.-Y.; Yuan, H.-Y.; Zhuang, Q.-L.; Deng, H.-G.; Tao, B.-X. & Zhang, B.-H. (2025). Synergistic effects of biochar and phosphate fertilizer on fungal communities and soybean productivity in microplastic-contaminated alkaline soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 306, 119287. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.119287>
- Verma, A.; Chand, N.; Upadhyay, P.; Sharma, S. & Prajapati, S. K. (2024). Systematic review on microplastics as a threat to terrestrial and aquatic eco-environment. *Sustainable Chemistry One World*, 3, 100013. <https://doi.org/10.1016/j.scowo.2024.100013>
- Wang, J.-Y.; Wang, M.; Shi, J.-W.; Li, B. L.; Liu, L.; Duan, P.-F. & Chen, Z.-J. (2025). The effects of microplastics and heavy metals individually and in combination on the growth of water spinach (*Ipomoea aquatica*) and rhizosphere microorganisms. *Agronomy*, 15(6), 1319. <https://doi.org/10.3390/agronomy15061319>
- Wang, R.; Yang, L.; Guo, M.; Lin, X.; Wang, R. & Guo, S. (2024). Effects of microplastic properties and dissolved organic matter on phosphorus availability in soil and aqueous mediums. *Environmental Pollution*, 340, 122784. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122784>
- Wang, W.; Xie, Y.; Li, H.; Dong, H.; Li, B.; Guo, Y.; Wang, Y.; Guo, X.; Yin, T.; Liu, X. & Zhou, W. (2024). Responses of lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth and soil properties to conventional non-biodegradable and new biodegradable microplastics. *Environmental Pollution*, 341, 122897. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122897>
- Wang, X.; Qu, S. & Pan, J. (2025). The effects of different types microplastics on soil properties and the biochemistry of Chinese cabbage under different dosages and exposure times. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 107(10), 1865–1892. <https://doi.org/10.1080/02772248.2025.2572841>

- Wasnik, S.; Cheng, S.; Keang, K.; Zhang, H. & Cross, J. S. (2026). Impact of tire particles and tire leachate contaminants on plant physiology and soil health: Case study in mung bean and tomato. *NanoImpact*, 41, 100601. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2025.100601>
- Wu, C.; Song, X.; Wang, D.; Ma, Y.; Shan, Y.; Ren, X.; Hu, H.; Cui, J. & Ma, Y. (2024). Combined effects of mulch film-derived microplastics and pesticides on soil microbial communities and element cycling. *Journal of Hazardous Materials*, 466, 133656. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133656>
- Xiong, Z.; Wu, P.; Xiang, P.; Chen, X.; Peng, L.; Zou, L.; Xu, J. & Li, Q. (2025). Application of *Acinetobacter radioresistens* to promote the growth of *Cucumis sativus* L. contaminated with polystyrene microplastics. *Journal of Hazardous Materials*, 488, 137388. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.137388>
- Xu, J.; Lv, L.; Li, Z.; Mo, X.; He, M. & Lin, Y. (2025). Effects of microplastic degradability and concentrations on antibiotic resistance genes between soil and phyllosphere. *Emerging Contaminants*, 11(4), 100564. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2025.100564>
- Xu, Y.; Li, H.; Zhao, T. & Rillig, M. C. (2025). Spray paint-derived microplastics influence soil properties and microbial activity through their composite composition. *Journal of Hazardous Materials*, 498, 140009. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.140009>
- Yang, M.; Huang, D.-Y.; Tian, Y.-B.; Zhu, Q.-H.; Zhang, Q.; Zhu, H.-H. & Xu, C. (2021). Influences of different source microplastics with different particle sizes and application rates on soil properties and growth of Chinese cabbage (*Brassica chinensis* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 222, 112480. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112480>
- Yu, Q.; Gao, B.; Wu, P.; Chen, M.; He, C. & Zhang, X. (2023). Effects of microplastics on the phytoremediation of Cd, Pb, and Zn contaminated soils by *Solanum photeinocarpum* and *Lantana camara*. *Environmental Research*, 231, 116312. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116312>
- Yue, J.; He, Y.; Ma, W.; Zhao, C.; Liu, Y.; Zhang, L.; Li, G. & Zhang, Y. (2026). Arbuscular mycorrhizal fungi mitigate microplastic-induced shifts in soil nematode communities. *Applied Soil Ecology*, 219, 106765. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.106765>
- Zhang, X.; Zhao, Y.; Lv, J.; Guo, W.; Ye, Z.; Ming, Y.; Han, W.; Chen, X.; Zhu, Y.; Zhang, J. & Li, Y. (2026). Effects of microplastics and acid rain on soil chemical properties, enzyme activity, and bacterial communities. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 309, 119640. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.119640>
- Zhang, Y.; Chen, Y.; Jiao, R.-Q.; Gao, S.-S.; Li, B. L.; Li, Y.-Y.; Han, H. & Chen, Z.-J. (2025). Beneficial microbial consortia effectively alleviated plant stress caused by the synergistic toxicity of microplastics and cadmium. *Industrial Crops and Products*, 225, 120479. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.120479>
- Zhang, Y.; Hao, S.; Li, P.; Du, Z.; Zhou, Y.; Wang, G.; Liang, Z. & Dou, M. (2024). Effects of different microplastics on wheat's (*Triticum aestivum* L.) growth characteristics and rhizosphere soil environment. *Plants*, 13(24), 3483. <https://doi.org/10.3390/plants13243483>
- Zhang, Y.; Zhao, S.-Y.; Zhang, R.-H.; Li, B. L.; Li, Y.-Y.; Han, H.; Duan, P.-F. & Chen, Z.-J. (2024). Screening of plant growth-promoting rhizobacteria helps alleviate the joint toxicity of PVC+Cd pollution in sorghum plants. *Environmental Pollution*, 355, 124201. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124201>

- Zhang, Z.; Lai, X.; Xiao, C.; Li, Y.; Yu, Y. & Yao, H. (2023). Effect of different microplastics on phosphorus availability in an alkaline paddy soil. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(11), 707. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06722-w>
- Zhang, Z.; Peng, W.; Duan, C.; Zhu, X.; Wu, H.; Zhang, X. & Fang, L. (2022). Microplastics pollution from different plastic mulching years accentuate soil microbial nutrient limitations. *Gondwana Research*, 108, 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.07.028>
- Zhang, Z.; Wang, W.; Liu, J. & Wu, H. (2024). Discrepant responses of bacterial community and enzyme activities to conventional and biodegradable microplastics in paddy soil. *Science of The Total Environment*, 909, 168513. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168513>
- Zhao, M.; Zou, G.; Li, Y.; Pan, B.; Wang, X.; Zhang, J.; Xu, L.; Li, C. & Chen, Y. (2025). Biodegradable microplastics coupled with biochar enhance Cd chelation and reduce Cd accumulation in Chinese cabbage. *Biochar*, 7(1), 31. <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00418-y>
- Zhuang, M.; Qiao, C.; Han, L.; Bi, Y.; Cao, M.; Wang, S.; Guo, L.; Pang, R. & Xie, H. (2024). Multi-omics analyses reveal the responses of wheat (*Triticum aestivum* L.) and rhizosphere bacterial community to nano(micro)plastics stress. *Journal of Nanobiotechnology*, 22(1), 507. <https://doi.org/10.1186/s12951-024-02777-x>