

Artículo de revisión

Tratamiento de microplásticos en sistemas acuáticos continentales: Una revisión sistemática de tecnologías y eficiencia

Treatment of Microplastics in Continental Aquatic Systems: A Systematic Review of Technologies and Efficiency

Cristopher Antony Huamán-Malqui  Mayerly Esther Jaramillo-Mori  Sandra Noemí Villalobos-Tafur*  Evelyn Yosily Zuta-Zuta 

Facultad de Ingeniería Ambiental, Biosistemas y de la Energía (FIABE), Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Chachapoyas, Perú.

***Autora de correspondencia:**
Villalobos Tafur Sandra Noemí,
email: 7345248522@untrm.edu.pe

RESUMEN

La contaminación por microplásticos (MP) en sistemas acuáticos constituye un desafío creciente para la calidad del agua debido a su persistencia y limitada eliminación mediante tratamientos convencionales. Esta revisión sistemática analizó las tecnologías y estrategias de remoción de MP en sistemas acuáticos continentales a partir de 61 artículos seleccionados de bases científicas. La producción científica se concentró entre 2021 y 2026, con mayor número de publicaciones en 2024 y 2025, lo que evidencia una línea de investigación reciente y en expansión. Las tecnologías más reportadas fueron coagulación-floculación, filtración granular y biofiltros, mientras que los polímeros más frecuentes fueron poliestireno (PS), polietileno (PE), polipropileno (PP), tereftalato de polietileno (PET) y policloruro de vinilo (PVC). En eficiencia de remoción, los tratamientos físicos destacaron por adsorción física, membranas y flotación; los químicos por fotocatalisis, ozonización y electrocoagulación; y los biológicos por biodegradación microbiana, biofiltros y humedales artificiales. Sin embargo, varias tecnologías con altas eficiencias fueron reportadas por pocos estudios, limitando su comparación directa. Predominaron las evaluaciones a escala de laboratorio, con menor representación de estudios piloto e *in situ*. En conjunto, la remoción de MP estuvo condicionada por la tecnología aplicada, las características del polímero, la matriz acuosa y la escala de evaluación. Se requiere fortalecer la validación de estas tecnologías en condiciones reales de operación para mejorar su aplicabilidad en el tratamiento de MP en ambientes acuáticos continentales. Estos hallazgos evidencian avances tecnológicos relevantes, aunque persisten limitaciones asociadas con la escasa validación a escala piloto e *in situ* y la heterogeneidad experimental.

Palabras clave: Eficiencia de remoción de microplásticos, tratamiento en aguas continentales.

ABSTRACT

Microplastic (MP) pollution in aquatic systems poses a growing challenge to water quality due to its persistence and limited removal by conventional treatment methods. This systematic review analyzed technologies and strategies for removing MP from inland aquatic systems based on 61 articles selected from scientific databases. Scientific output was concentrated between 2021 and 2026, with the highest number of publications in 2024 and 2025, indicating a recent and expanding line of research. The most frequently reported technologies were coagulation-flocculation, granular filtration, and biofilters, while the most common polymers were polystyrene (PS), polyethylene (PE), polypropylene (PP), polyethylene terephthalate (PET), and polyvinyl chloride (PVC). In terms of removal efficiency, physical treatments stood out for physical adsorption, membranes, and flotation; chemical treatments for photocatalysis, ozonation, and electrocoagulation; and biological treatments for microbial biodegradation, biofilters, and constructed wetlands. However, several technologies with high efficiencies were reported by only a few studies, limiting their direct comparison. Laboratory-scale evaluations predominated, with fewer pilot-scale and *in situ* studies. Overall, MP removal was influenced by the technology used, the polymer characteristics, the aqueous matrix, and the scale of the evaluation. Further validation of these technologies under real-world operating conditions is needed to improve their applicability in the treatment of MP in continental aquatic environments. These findings demonstrate significant technological advances, although limitations persist due to insufficient validation at the pilot and *in situ* scales and experimental heterogeneity.

Keywords: Inland water treatment; microplastic removal efficiency.

Historial del artículo

Recibido: 16 de julio del 2026
Aceptado: 18 de agosto del 2026
Publicado: 04 de setiembre del 2026

INTRODUCCIÓN

El aumento sostenido en la producción y el uso de plásticos ha favorecido la dispersión de partículas de pequeño tamaño en el ambiente, conocidas como microplásticos (MP), definidos como fragmentos menores a 5 mm (Na et al., 2023). En función de su origen, estos se clasifican en MP primarios, fabricados intencionalmente en tamaños microscópicos, y secundarios, generados por la degradación de plásticos de mayor tamaño (Mompó-Curell et al., 2026). Debido a su persistencia ambiental y a sus potenciales efectos adversos, han sido reconocidos como contaminantes emergentes de creciente preocupación (Büngener et al., 2024). En los ecosistemas acuáticos, su presencia se vincula principalmente a fuentes terrestres, destacando las descargas de aguas residuales, los efluentes industriales y la escorrentía urbana como principales vías de ingreso (Rullander et al., 2023). En este sentido, los MP se consideran contaminantes emergentes de gran importancia debido a su amplia dispersión en océanos, ríos y lagos (Sánchez et al., 2024).

En este contexto, la contaminación por MP se ha convertido en un problema ambiental y de salud pública creciente, debido a su amplia presencia en los ecosistemas acuáticos y a los riesgos que representa para los organismos y las personas (Ta et al., 2025). Su toxicidad está asociada a su composición química, sus características físicas y los aditivos incorporados durante su fabricación (Mebrat & Mekonnen, 2026). Además, su alta superficie específica favorece la adsorción de otros contaminantes, facilitando su transporte en el ambiente (Mebrat & Mekonnen, 2026). Asimismo, pueden desplazarse a largas distancias, encontrándose en aguas superficiales, sedimentos, glaciares y sistemas de aguas subterráneas (Chen et al., 2026). En particular, el transporte de MP en acuíferos aluviales y kársticos a mayores distancias es posible, lo que evidencia que incluso las aguas subterráneas están sujetas a contaminación (La et al., 2024). La exposición humana ocurre principalmente mediante ingestión, inhalación y contacto dérmico, con evidencia reciente que confirma su presencia en diversos tejidos y fluidos como pulmones, placenta, cerebro, sangre y placas arteriales (Thathsarani et al., 2025; Thathsarani et al., 2023).

Por otro lado, el agua constituye un recurso vital para la vida, la estabilidad de los ecosistemas y el desarrollo de actividades industriales (Taligrot et al., 2025). Sin embargo, en los últimos años, los MP que no son eliminados en las plantas de tratamiento de aguas residuales (WWTP) terminan ingresando a fuentes de agua, lo que ha incrementado la preocupación de la comunidad científica (Velasco et al., 2023; Mathew et al., 2024). En Europa, por ejemplo, los MP son de los contaminantes más frecuentes en aguas superficiales, con concentraciones que oscilan entre 0,03 y 187 000 partículas por metro cúbico en ríos (Wiśniowska et al., 2024). De manera global, se han detectado MP no solo en agua de mar y agua dulce, sino lo que permitió seleccionar 39 artículos. La búsqueda se complementó con registros procedentes de Scopus y PubMed, de

también en matrices como sedimentos, agua de grifo y aguas residuales (Bordós et al., 2020).

En relación con la exposición humana, se estima que las personas que consumen agua embotellada pueden ingerir hasta 20 veces más MP que aquellas que consumen agua del grifo; sin embargo, también se ha reportado que aproximadamente el 81 % del agua potable del grifo a nivel mundial está contaminada con MP (Velasco et al., 2023). En consecuencia, los MP tienen implicaciones de gran alcance, con el potencial de generar amenazas significativas a la salud humana y al bienestar social, económico y ambiental, proyectándose además que su contaminación continuará en aumento incluso si la producción de plástico se detuviera (Senathirajah et al., 2023).

La eliminación de MP en ambientes acuáticos representa un punto clave para la reducción de esta contaminación. Aunque se han desarrollado diversas tecnologías para su remoción, la mayoría aún se encuentra en etapa de laboratorio (Gao et al., 2022), y su eficiencia puede variar significativamente según las propiedades físicas y químicas de los MP (Thathsarani et al., 2025). Por ello, la prevalencia y los efectos adversos de estos contaminantes hacen necesario el desarrollo de estrategias y tecnologías viables para su eliminación, especialmente en el agua, cuya calidad es fundamental para la salud humana y la sostenibilidad ambiental (Senathirajah et al., 2023). En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo analizar las tecnologías utilizadas para la eliminación de MP en sistemas acuáticos continentales. Para ello, se identificaron las tecnologías de remoción más empleadas, se determinaron los tipos predominantes de MP reportados en los estudios analizados y se evaluó la eficiencia de las tecnologías físicas, químicas y biológicas aplicadas a su eliminación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Estrategia de búsqueda y selección de estudios

La revisión sistemática se realizó mediante una búsqueda bibliográfica estructurada en ScienceDirect, Scopus y PubMed, orientada a recopilar estudios sobre la remoción de microplásticos en sistemas acuáticos. Para ello, se empleó la ecuación "microplastic" AND (removal OR treatment OR remediation) AND (freshwater OR river OR lake) AND efficiency NOT marine, con el fin de recuperar investigaciones que abordaron procesos de tratamiento o remediación y reportaron eficiencias de eliminación.

En ScienceDirect se identificaron inicialmente 657 artículos, los cuales fueron filtrados mediante la revisión de títulos, considerando solo aquellos que mencionaron explícitamente los términos "microplástico" o "microplásticos"; así se obtuvieron 214 documentos potencialmente relevantes. Posteriormente, se evaluaron las palabras clave y los resúmenes, aplicando criterios de inclusión relacionados con la evaluación de tecnologías de tratamiento y el reporte de eficiencias de remoción,

los cuales se incorporaron 19 y 3 artículos, respectivamente, después de verificar el cumplimiento de los criterios establecidos y eliminar duplicados respecto a los documentos previamente identificados. Como resultado del proceso de selección, se obtuvo un corpus definitivo de 61 artículos, los cuales fueron incluidos en el análisis final. (Figura 1).

Se incluyeron únicamente publicaciones de acceso abierto comprendidas entre 2004 y 2026. Este periodo se definió debido a que el año 2004 representó un punto de referencia importante en la consolidación del término "microplásticos" y en el desarrollo de investigaciones más detalladas sobre esta problemática ambiental (Ali et al., 2025). Asimismo, se excluyeron

los estudios centrados en ecosistemas marinos, ya que el alcance de la revisión se delimitó a sistemas acuáticos continentales, residuales y artificiales. De cada artículo seleccionado se extrajo información sobre la fuente de agua evaluada, el tipo de MP analizado, la escala del estudio (laboratorio, piloto o *in situ*), la tecnología empleada (física, química o biológica) y la eficiencia de remoción reportada; información que fue recopilada en una matriz de extracción de datos almacenada en el repositorio público Figshare (<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.33250854>) con el propósito de garantizar la trazabilidad, disponibilidad y reproducibilidad de los datos empleados en el estudio.

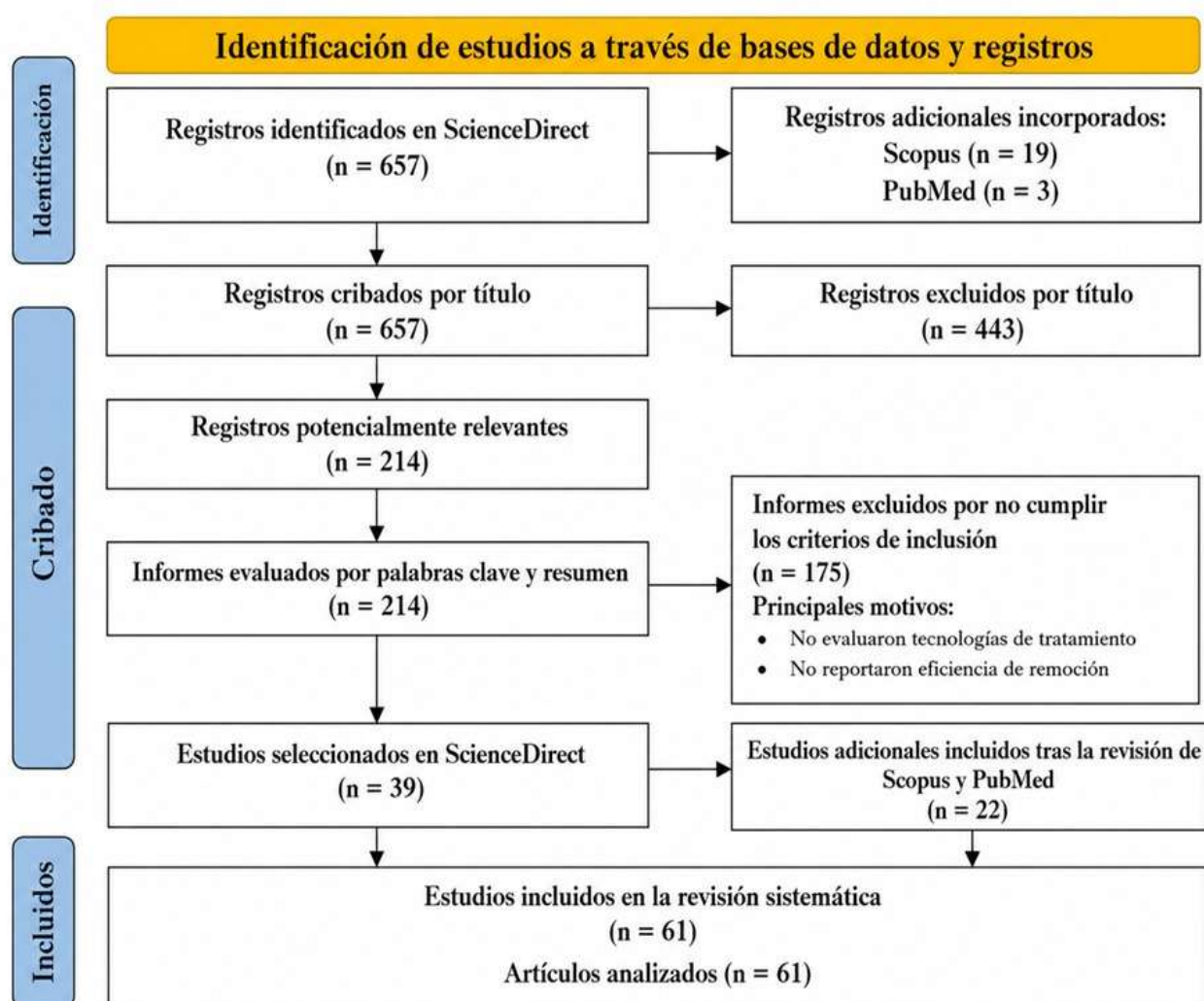


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA.

RESULTADOS

Análisis bibliométrico y visualización de la producción científica

El análisis bibliométrico permitió examinar la evolución de la producción científica y las principales tendencias temáticas relacionadas con los tratamientos de MP en sistemas acuáticos continentales. Para ello, se consideraron los artículos seleccionados en el periodo de estudio, con el propósito de identificar el comportamiento anual de las publicaciones y la relación entre las palabras clave más recurrentes. Estos resultados brindaron una visión general sobre el interés científico reciente en torno a las tecnologías de remoción de MP y los enfoques más abordados en la literatura revisada.

La producción científica sobre tecnologías de tratamiento para la remoción de MP se registró a partir de 2021, año en el que se identificó un artículo. Posteriormente, se observó un incremento en 2022 (7) y 2023 (12), alcanzando los valores más altos en 2024 y 2025, con 16 artículos en cada año. Para 2026 se registraron 9 artículos dentro del periodo analizado (Figura 2). La red de co-ocurrencia de palabras clave mostró que el término “microplastics” ocupó la posición central y presentó la mayor cantidad de conexiones con conceptos asociados a la remoción y tratamiento de MP. Entre los términos más vinculados se identificaron “removal efficiency”, “filtration”, “sand filtration”, “wastewater”, “drinking water”, “adsorption”, “bioremediation” y “wastewater treatment”. Además, se observaron agrupaciones relacionadas con tecnologías de tratamiento, fuentes de agua y tipos de MP, lo que permitió reconocer los

principales enfoques temáticos presentes en los estudios revisados (Figura 3).

Tecnologías de remoción de MP más usadas en sistemas acuáticos continentales

En la distribución de tecnologías identificadas, se observó que las tecnologías químicas estuvieron dominadas por la coagulación-floculación, con 33 registros, posicionándose como la alternativa más reportada dentro de este grupo. En las tecnologías biológicas, los biofiltros presentaron la mayor frecuencia, con 8 registros, seguidos por las biopelículas microbianas (4 registros). Por otro lado, dentro de las tecnologías físicas, la filtración granular fue la más predominante, con 24 registros, seguida por la sedimentación y la adsorción física, ambas con 18 registros. Asimismo, destacaron el tamizado/microtamizado (14 registros) y las membranas (10 registros), mientras que las demás tecnologías presentaron frecuencias menores dentro de los estudios analizados.

Los resultados mostraron que la combinación de tecnologías físicas y químicas fue la más empleada, con 20 artículos (66,7 %), lo que evidenció una preferencia por integrar procesos de separación física con tratamientos químicos para mejorar la remoción de MP. Las combinaciones físicas y biológicas, así como las físicas, químicas y biológicas, fueron reportadas en 5 artículos cada una (16,7 %). En contraste, no se identificaron estudios que utilizaran exclusivamente tecnologías químicas y biológicas, lo que indicó que los procesos físicos constituyeron un componente principal en los sistemas de tratamiento combinados analizados (Tabla 1).

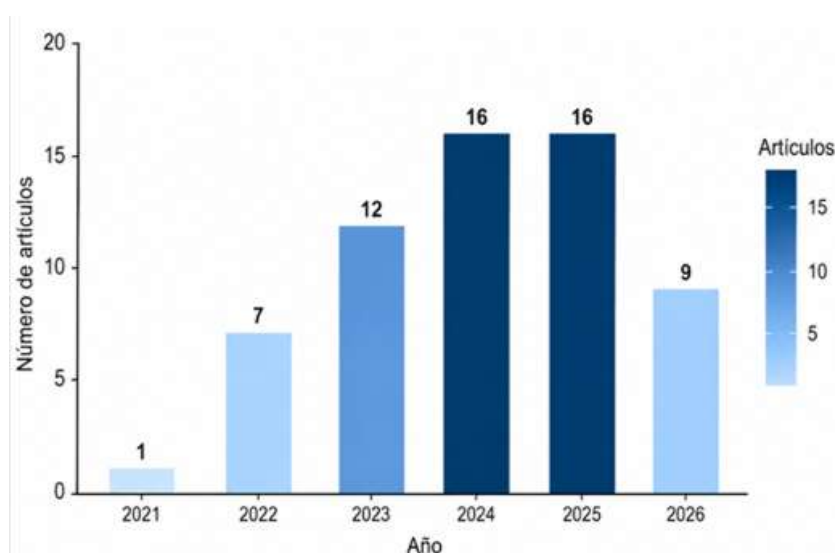


Figura 2. Evolución temporal de la producción científica sobre tecnologías de remoción de MP en sistemas acuáticos continentales.

Red de co-ocurrencia de palabras clave

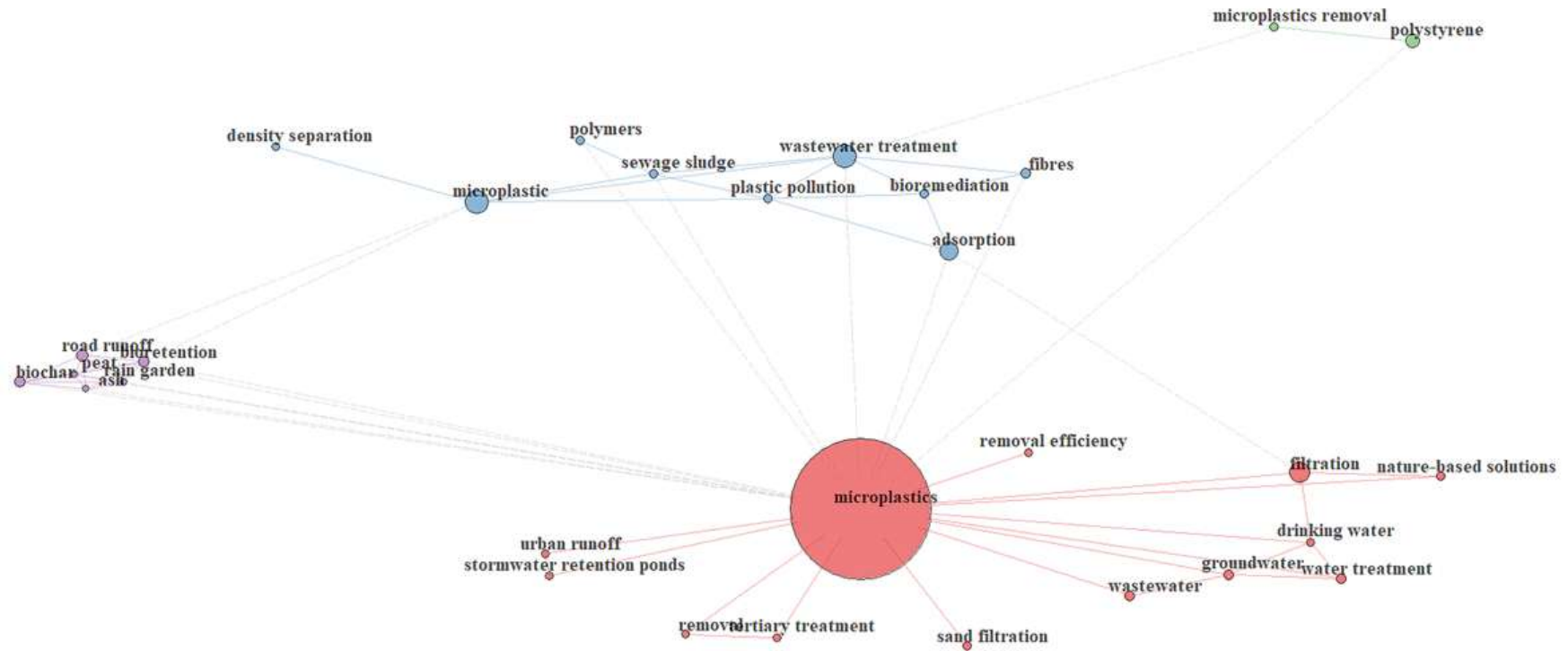


Figura 3. Red de co-ocurrencia de palabras clave sobre tratamientos de MP.

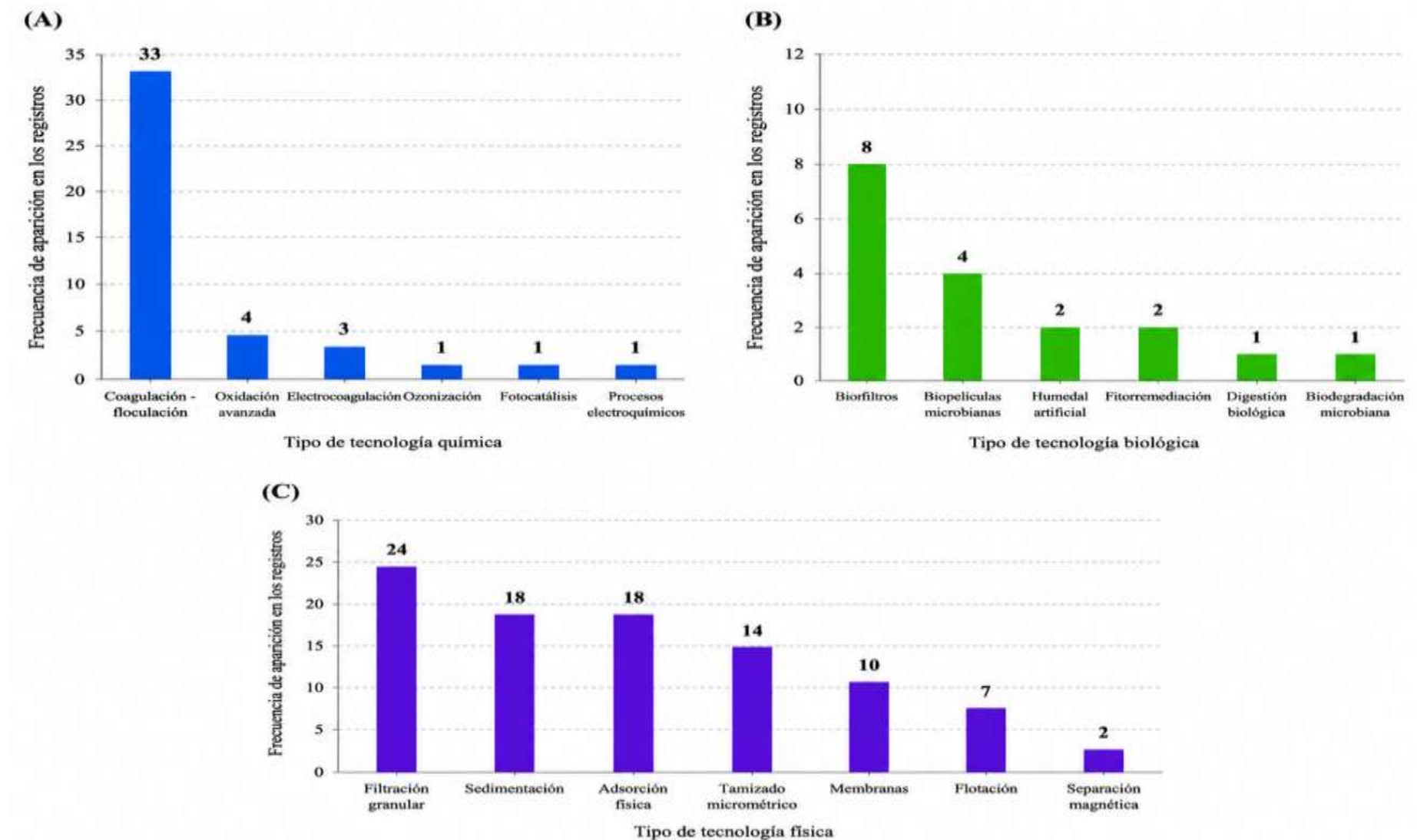


Figura 4. Tipos de tecnologías más usadas en los artículos seleccionados. (A)Tecnologías químicas identificadas; (B) Tecnologías biológicas identificadas; (C) Tecnologías físicas identificadas.

Tabla 1. Tecnologías de remoción combinadas utilizadas en los artículos.

Tipo de combinación tecnológica	N° de artículos	Tecnologías combinadas identificadas
Físicas + químicas	20	Coagulación-floculación + sedimentación; coagulación -floculación + filtración granular; electrocoagulación + flotación; ozonización + carbón activado granular; adsorción física + modificación química del material adsorbente.
Físicas + biológicas	5	Filtración granular + biofiltros; sistemas de biorretención vegetados; filtros de biocarbón; muros verdes vegetados; biofiltros con materiales orgánicos o minerales.
Físicas + químicas + biológicas	5	Filtración rápida en arena + coagulación-floculación + lodos activados; ultrafiltración + coagulación + biofiltros; adsorción física + modificación química + bioadsorbentes naturales.
Químicas + biológicas	0	No se identificaron artículos que combinaran únicamente tratamientos químicos y biológicos sin incluir una etapa física dentro del sistema.
Total, de artículos con tecnologías combinadas	30	

Los resultados mostraron que la combinación de tecnologías físicas y químicas fue la más empleada, con 20 artículos (66,7 %), lo que evidenció una preferencia por integrar procesos de separación física con tratamientos químicos para mejorar la remoción de MP. Las combinaciones físicas y biológicas, así como las físicas, químicas y biológicas, fueron reportadas en 5 artículos cada una (16,7 %). En contraste, no se identificaron estudios que utilizaran exclusivamente tecnologías químicas y biológicas, lo que indicó que los procesos físicos constituyeron un componente principal en los sistemas de tratamiento combinados analizados (Tabla 1).

Tipos de fuentes de aguas evaluadas

En cuanto a las fuentes de agua evaluadas donde se identificaron los MP, se observó que los estudios se concentraron principalmente en aguas superficiales naturales, con 23 registros (25.0 %), seguidas de las aguas residuales urbanas, con 19 registros (20.7 %). Asimismo, el agua con suspensión sintética de MP representó una proporción importante, con 17 registros (18.5 %), lo que evidenció una mayor presencia de ensayos bajo condiciones controladas. Las demás fuentes de agua presentaron frecuencias más bajas, entre 3 y 4 registros, indicando una menor representación dentro de los estudios analizados (Figura 5).

La revisión de los estudios permitió identificar 26 tipos de MP, de los cuales se tuvo una mayor recurrencia de cinco tipos de

MP. El PS presentó la frecuencia más alta (34), seguido por el PE (31), el PP (28), el PET (26) y el PVC (20). En una frecuencia intermedia se registraron otros polímeros como PA (15), PMMA (12), PES (11), PU (4) y EVA (4). Asimismo, los MP con frecuencias de 2 y 1 aparecieron de forma limitada dentro de los registros analizados (Figura 6).

Escalas de estudio en las que se identificaron MP

Los resultados mostraron que la escala de laboratorio fue la más empleada para la identificación de MP, con 39 estudios (63.9 %), seguida de la escala *in situ* con 16 estudios (26.2 %) y la escala piloto con 6 estudios (9.8 %) (Figura 7).

Eficiencia de las tecnologías de remoción de MP (físicas, químicas y biológicas) en sistemas acuáticos continentales

Eficiencia física

En los tratamientos físicos evaluados, la adsorción física presentó la mayor eficiencia promedio de remoción de MP (96.94 %), seguida por las membranas (92.2 %) y la flotación (86.5 %). Dentro del grupo de otros tratamientos físicos destacaron alternativas como el filtro prensa de cámara, el enfoque acústico en paralelo y en serie, y los mini-hidrociclones de acero inoxidable impresos en 3D. En contraste, la separación magnética registró la menor eficiencia promedio (53.1 %) (Tabla 2).

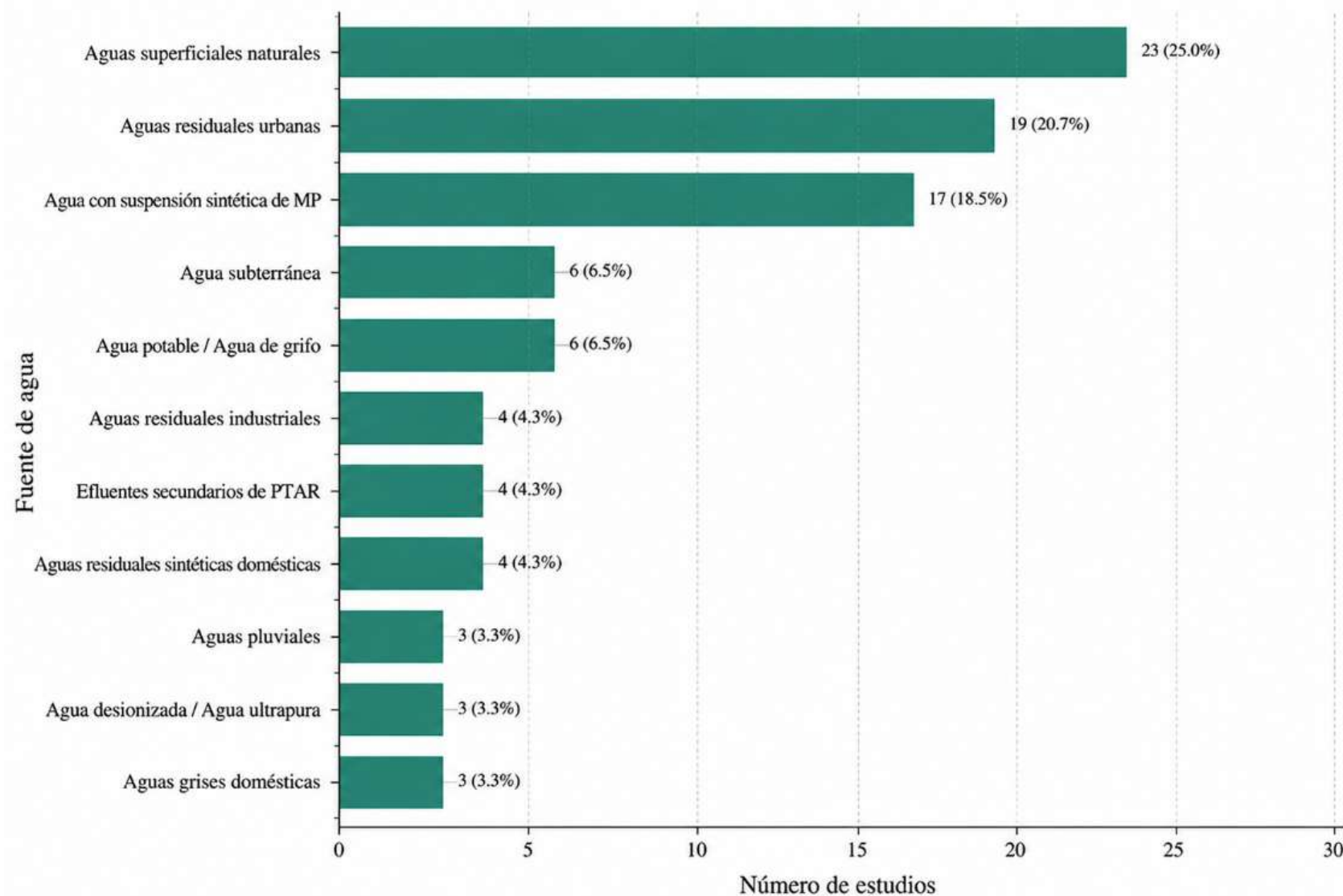


Figura 5. Distribución de las fuentes de agua evaluadas en los estudios incluidos en la revisión sistemática.

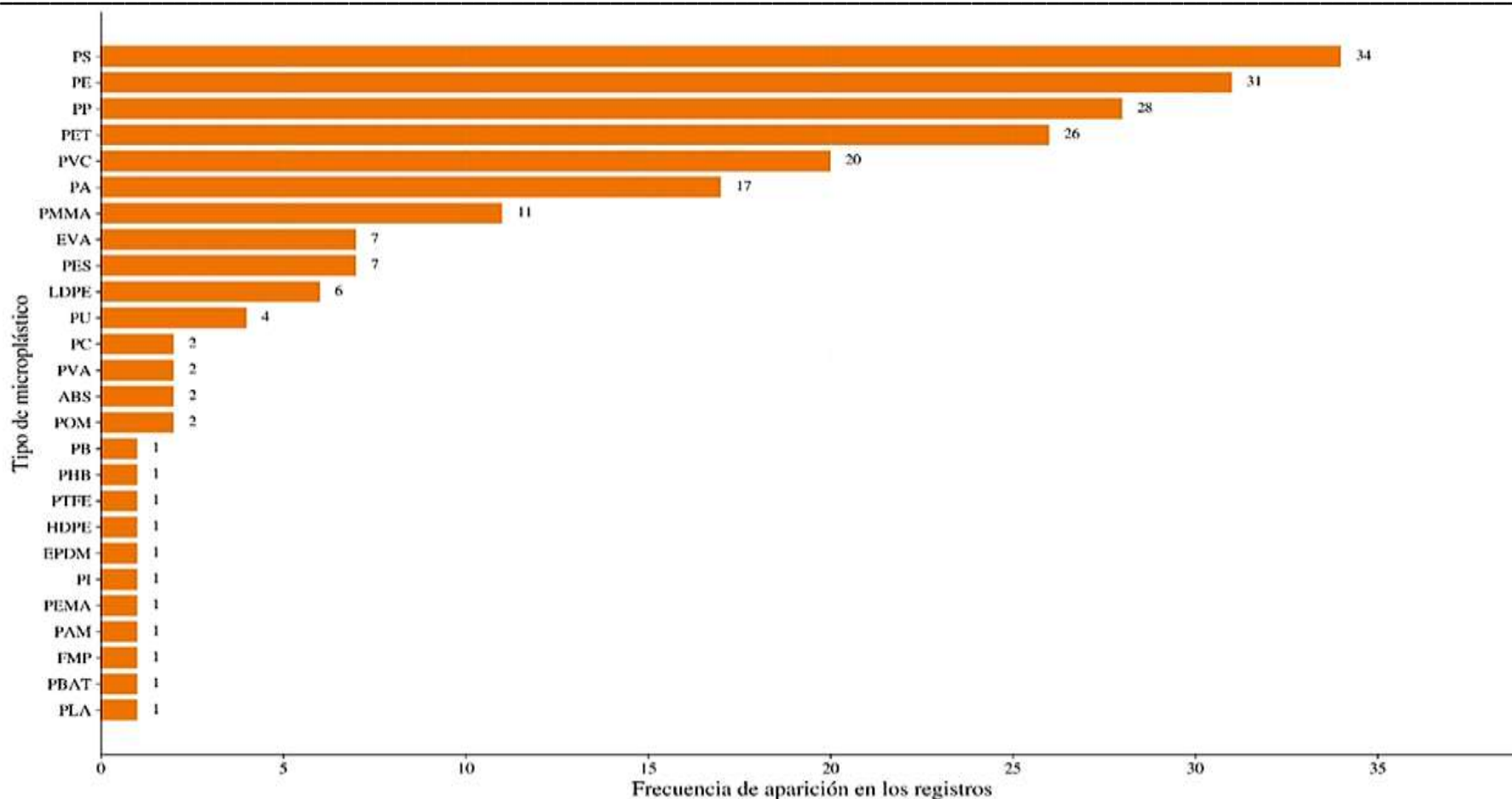


Figura 6. Tipos de MP identificados según su frecuencia de aparición en los registros analizados. PS = poliestireno; PE = polietileno; PP = polipropileno; PET = tereftalato de polietileno; PVC = policloruro de vinilo; PA = poliamida/nylon; PMMA = polimetilmetacrilato; EVA = etileno acetato de vinilo; PES = poliéster; LDPE = polietileno de baja densidad; PU = poliuretano; PC = policarbonato; PVA = alcohol polivinílico; ABS = acrilonitrilo butadieno; POM = polioximetileno; PB = polibutadieno; PHB = polihidroxibutirato; PTFE = politetrafluoroetileno; HDPE = polietileno de alta densidad; EPDM = etileno propileno dieno monómero; PI = poliiimida; PEMA = polietilmetacrilato; PAM = poliacrilamida; FMP = microplásticos fibrosos; estireno; PBAT = polibutileno adipato tereftalato; PLA = ácido poliláctico.

Tabla 2. Eficiencia promedio de remoción de MP mediante tratamiento físico.

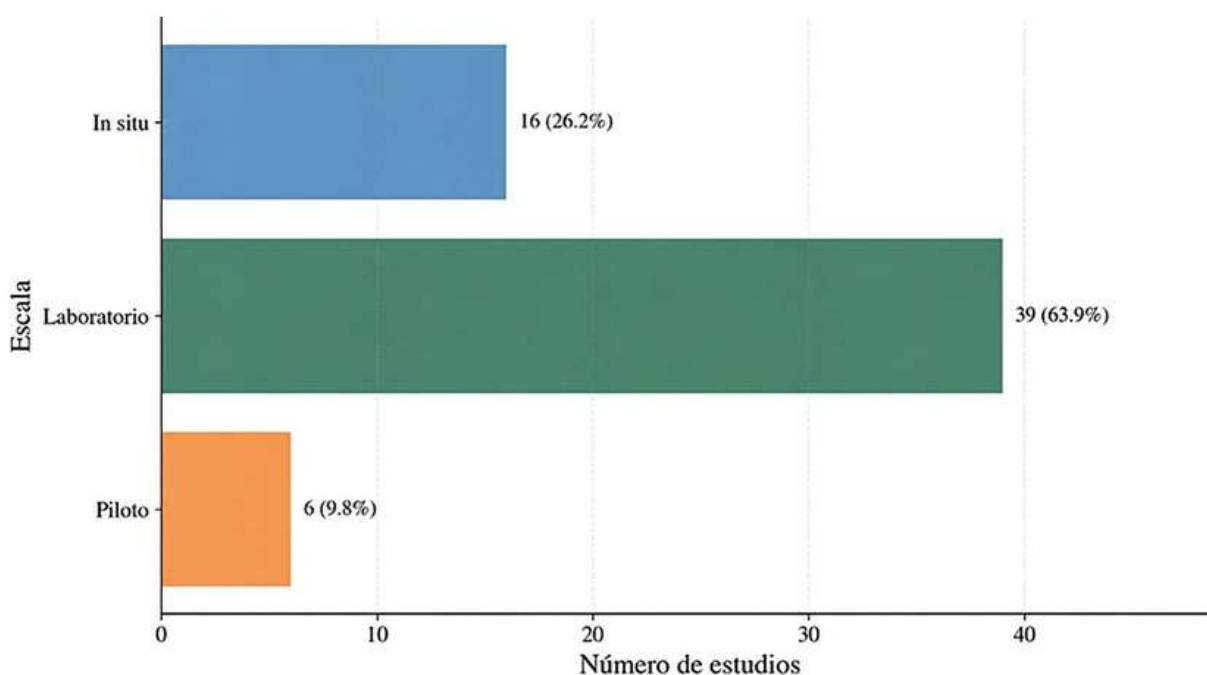
Tratamiento físico	Eficiencia promedio (%)	Cantidad de artículos registrados
Filtración Granular	85.9	24
Sedimentación	62.5	18
Adsorción física	96.94	18
Tamizado/Microtamizado	68.9	14
Membranas	92.2	10
Flotación	86.5	7
Separación Magnética	53.1	2

Tabla 3. Eficiencia promedio de remoción de MP mediante tratamiento químico.

Tratamiento químico	Eficiencia promedio (%)	Cantidad de artículos registrados
Coagulación - Flocculación	64%	33
Electrocoagulación	86.30%	3
Ozonización	98%	1
Fotocatálisis	100%	1
Procesos Electroquímicos	81.75%	1

Tabla 4. Eficiencia promedio de remoción de MP mediante tratamiento biológico.

Tratamiento Biológico	Eficiencia promedio (%)	Cantidad de artículos registrados
Biofiltros	88%	8
Biopelículas microbianas	81%	3
Humedal artificial	86%	2
Fitorremediación	61%	2
Biodegradación microbiana	98%	2


Figura 7. Distribución de los estudios según la escala de evaluación.

Eficiencia química

En los tratamientos químicos evaluados, la fotocatálisis presentó la mayor eficiencia promedio de remoción de MP (100 %), seguida por la ozonización (98 %), la electrocoagulación (86.30 %), los procesos electroquímicos (81.75 %) y otros tratamientos químicos (78.43 %), entre los que se incluyeron la fotodegradación UV/UV- H_2O_2 , el uso de hipoclorito de sodio (NaOCl) y la modificación química con polietilenimina (PEI). En contraste, la coagulación-floculación registró la menor eficiencia promedio (64 %), aunque concentró la mayor cantidad de artículos registrados (33), evidenciando su mayor presencia dentro de los estudios analizados (Tabla 3).

Eficiencia biológica

En los tratamientos biológicos evaluados, la biodegradación microbiana presentó la mayor eficiencia promedio de remoción de MP (98 %), seguida por los biofiltros (88 %), los humedales artificiales (86 %) y las biopelículas microbianas (81 %). En menor proporción, se registraron la digestión biológica (67 %) y la fitorremediación (61 %), esta última con la eficiencia promedio más baja. Respecto al número de artículos que reportaron estas eficiencias, los biofiltros concentraron el mayor catidad de registros (8), seguidos por las biopelículas microbianas (3), mientras que los demás tratamientos fueron reportados en 1 o 2 artículos (Tabla 4).

DISCUSIÓN

Tendencia reciente de la producción científica sobre tratamientos de MP

Aunque la búsqueda bibliométrica consideró el periodo 2004–2026, los estudios incluidos sobre tecnologías de tratamiento para la remoción de MP en sistemas acuáticos continentales se concentraron entre 2021 y 2026. Este comportamiento no necesariamente refleja la ausencia de investigaciones previas sobre MP, sino el desarrollo más reciente de estudios orientados específicamente a su remoción mediante alternativas tecnológicas en estos sistemas (Rodríguez-Narváez et al., 2021). La mayor producción científica se registró en 2024 y 2025, con 16 artículos publicados en cada año, lo que evidencia una aceleración del interés académico por el desarrollo de estrategias de tratamiento, posiblemente asociada con el reconocimiento progresivo de los MP como contaminantes emergentes en ecosistemas acuáticos continentales. Esta tendencia coincide con Wong et al. (2020), quienes señalaron que los estudios sobre MP en ambientes no marinos habían recibido menor atención en comparación con los ecosistemas marinos, pese a la importancia de estos ambientes en el transporte, acumulación y exposición a dichos contaminantes.

De manera complementaria, Chowdhury et al. (2023) señalaron que la presencia de MP en diferentes fuentes hídricas ha

impulsado investigaciones orientadas a su detección, tratamiento y remoción. En este sentido, el incremento de publicaciones registrado durante los últimos años evidencia la consolidación progresiva del tratamiento de MP como una línea de investigación en sistemas acuáticos continentales. No obstante, persisten limitaciones asociadas al predominio de estudios experimentales y a la escasa validación de las tecnologías bajo condiciones reales de operación. Por ello, resulta necesario fortalecer investigaciones comparativas que permitan determinar el desempeño de las diferentes alternativas, así como evaluar su escalabilidad, eficiencia y aplicabilidad frente a las características ambientales propias de estos sistemas y a diversos escenarios operacionales.

Tecnologías predominantes y eficiencia de remoción de MP

La coagulación-floculación fue la tecnología química más reportada, mientras que la filtración granular predominó dentro de los tratamientos físicos y los biofiltros dentro de los tratamientos biológicos. Esta distribución coincide con estudios recientes donde los procesos convencionales, como coagulación, sedimentación y filtración, continúan siendo ampliamente evaluados debido a su disponibilidad operativa y a su posible integración en plantas de tratamiento de agua potable y aguas residuales. En esa línea, Negrete Velasco et al. (2023) reportaron que los sistemas convencionales de tratamiento de agua potable pueden lograr una retención importante de MP y fibras sintéticas, especialmente mediante la combinación de coagulación, filtración en arena y carbón activado.

Respecto a los tratamientos físicos, las mayores eficiencias promedio se observaron en adsorción física, membranas y flotación, lo cual se relaciona con mecanismos de retención superficial, separación por tamaño, adhesión o arrastre de partículas. Rullander et al. (2023) demostraron que los filtros de flujo horizontal pueden retener MP presentes en aguas pluviales, destacando la importancia de los sistemas filtrantes para reducir partículas transportadas por escorrentía urbana. Asimismo, Lu et al. (2023) señalaron que tecnologías como la filtración por membranas, la adsorción y la coagulación-floculación-sedimentación son alternativas recurrentes para la remediación de MP en agua y aguas residuales.

En los tratamientos químicos, la fotocatálisis y la ozonización presentaron las eficiencias promedio más altas, aunque fueron reportadas por un menor número de artículos. Esto muestra que son tecnologías con alto potencial, pero con menor evidencia comparativa frente a procesos convencionales. La electrocoagulación también presentó una eficiencia relevante, lo cual coincide con Senathirajah et al. (2023), quienes indicaron que el tipo de polímero y la forma de la partícula influyen en el desempeño del tratamiento electroquímico. En contraste, la coagulación-floculación presentó una eficiencia promedio me-

nor en esta revisión, pero fue la tecnología química más frecuente, lo que confirma su importancia como alternativa ampliamente evaluada para la remoción de MP.

En relación con los tratamientos biológicos, la biodegradación microbiana, los biofiltros y los humedales artificiales mostraron eficiencias promedio elevadas. Estos resultados se relacionan con el creciente interés por soluciones basadas en la naturaleza y sistemas biológicos de bajo impacto. Büngener et al. (2024) evaluaron muros verdes para el tratamiento descentralizado de aguas grises y destacaron su potencial para retener MP. Sin embargo, la menor cantidad de artículos asociados a tecnologías biológicas indica que aún se requiere mayor validación experimental y aplicación en condiciones reales.

Microplásticos analizados y sus principales fuentes

Los MP más recurrentes en los estudios analizados fueron PS, PE, PP, PET y PVC. Esta predominancia coincide con revisiones previas que reportaron a estos polímeros como materiales ampliamente presentes en ambientes acuáticos y terrestres, debido a su uso masivo en productos de consumo, envases, textiles, materiales de construcción y residuos plásticos de corta vida útil. Wong et al. (2020) señalaron que las aguas residuales, los efluentes tratados, los lodos, la escorrentía superficial y la fragmentación de residuos plásticos constituyen vías importantes de ingreso de MP hacia sistemas acuáticos continentales. De manera similar, Chowdhury et al. (2023) indicaron que las principales fuentes de MP en agua dulce y agua potable incluyen efluentes urbanos, descargas industriales, escorrentía, degradación de residuos plásticos y procesos asociados al tratamiento de agua.

El PE y el PP suelen asociarse con bolsas, envases, tapas, recipientes y empaques livianos, por lo que su presencia en aguas superficiales puede relacionarse con residuos urbanos y transporte por escorrentía (Browne et al., 2011). El PET se vincula principalmente con botellas, fibras textiles y envases, mientras que el PS se asocia con espumas, empaques, utensilios descartables y fragmentos de productos de un solo uso (Li et al., 2020). El PVC, por su parte, se relaciona con tuberías, materiales de construcción, recubrimientos y algunos productos industriales (Koelmans et al., 2019). Asimismo, la presencia de PA, PMMA, PES, PU y EVA en frecuencias intermedias puede vincularse con fibras textiles, pinturas, adhesivos, espumas, cauchos y materiales sintéticos de uso industrial o doméstico (Hernandez et al., 2017).

Escala de aplicación y fuentes de agua evaluado

La predominancia de estudios a escala de laboratorio mostró que la mayoría de tecnologías de remoción de MP aún se evalúan bajo condiciones controladas (Wang et al., 2019). Este patrón es coherente con la literatura reciente, donde muchas tecnologías emergentes presentan altas eficiencias en ensayos experimentales, pero menor evidencia en sistemas piloto o aplicaciones *in situ* (Sun et al., 2019). Asimismo, la eficiencia

de remoción puede variar según el tamaño, la forma, la densidad, el tipo de polímero, la concentración inicial de MP y las características de la matriz acuosa (Li et al., 2020).

La menor presencia de estudios piloto e *in situ* representa una limitación importante para comparar directamente las tecnologías, debido a que las condiciones reales de tratamiento incluyen materia orgánica, sólidos suspendidos, variaciones de pH, caudal, temperatura y otros contaminantes (Koelmans et al., 2019). Por ello, aunque tecnologías como adsorción, membranas, fotocatalisis, ozonización y biodegradación microbiana mostraron eficiencias elevadas, su desempeño debe interpretarse considerando la escala experimental y el número de artículos que reportaron dichas eficiencias (Shen et al., 2022). En ese sentido, las tecnologías convencionales como filtración granular, coagulación-floculación y sedimentación continúan siendo relevantes por su mayor presencia en la literatura y su posible integración en sistemas existentes (Ma et al., 2020), mientras que las tecnologías avanzadas y biológicas requieren mayor validación para su aplicación a escala real (Talvitie et al., 2017).

El predominio de investigaciones en aguas superficiales y residuales confirma que estas matrices son consideradas las principales vías de transporte y acumulación de microplásticos, por lo que constituyen el principal foco para evaluar tecnologías de remoción (Akdogan & Guven, 2019). Asimismo, el uso frecuente de matrices sintéticas evidencia la necesidad de realizar más estudios en condiciones reales, debido a que factores como la materia orgánica y los sólidos suspendidos pueden afectar la eficiencia de los tratamientos (Enfrin et al., 2019). Finalmente, la limitada investigación en aguas subterráneas y de consumo humano pone de manifiesto un vacío de conocimiento que requiere mayor atención para fortalecer la evaluación del riesgo ambiental y sanitario (Xu et al., 2024).

CONCLUSIÓN

La remoción de MP en sistemas acuáticos continentales se ha convertido en un tema de creciente interés por su relación con la calidad del agua y los sistemas de tratamiento. Por ello, esta revisión analizó 61 artículos enfocados en las tecnologías y estrategias aplicadas para reducir la presencia de este contaminante emergente. Los estudios revisados abordaron con mayor frecuencia matrices como aguas superficiales naturales, aguas residuales urbanas y suspensiones sintéticas de MP, lo que mostró una orientación hacia la evaluación de tratamientos tanto en condiciones ambientales como experimentales. Las tecnologías de remoción más empleadas fueron la coagulación-floculación dentro de los tratamientos químicos, la filtración granular en los tratamientos físicos y los biofiltros en los tratamientos biológicos. Además, se identificó una mayor presencia de estudios a escala de laboratorio, lo que indica

que gran parte de las tecnologías evaluadas aún se encuentran en una fase experimental, con menor representación de aplicaciones piloto e *in situ*. Los tipos de MP predominantes en los estudios analizados fueron PS, PE, PP, PET y PVC, seguidos en menor frecuencia por PA, PMMA, PES, PU y EVA. Esta distribución mostró que los polímeros más evaluados correspondieron principalmente a materiales de amplio uso comercial, asociados a envases, empaques, fibras textiles, espumas, tuberías, recubrimientos y productos plásticos de consumo cotidiano. En cuanto a la eficiencia de remoción, los tratamientos físicos destacaron por los valores promedio obtenidos en adsorción física, membranas y flotación. En los tratamientos químicos, las mayores eficiencias promedio correspondieron a la fotocatalisis, ozonización y electrocoagulación, aunque algunas de estas tecnologías fueron reportadas por un número reducido de artículos. En los tratamientos biológicos, sobresalieron la biodegradación microbiana, los biofiltros y los humedales artificiales, mostrando un potencial importante como alternativas de menor impacto ambiental. En conjunto, la remoción de MP en sistemas acuáticos continentales estuvo condicionada por el tipo de tecnología aplicada, las características del polímero, la matriz acuosa y la escala de evaluación. Las tecnologías convencionales mantuvieron una mayor presencia en la literatura revisada, mientras que las alternativas avanzadas y biológicas mostraron eficiencias relevantes, pero requieren mayor validación en condiciones reales para fortalecer su aplicación en sistemas de tratamiento de agua.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas por el respaldo institucional y académico brindado durante el desarrollo de la presente investigación. Asimismo, se extiende un especial reconocimiento a la docente Martha Steffany Calderón Ríos por su valiosa orientación, acompañamiento académico y contribuciones durante el proceso de investigación, revisión y consolidación del presente artículo científico.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: CAHM, EYZZ, SNVT; Metodología: EYZZ; Investigación: CAHM, MEJM; Validación: EYZZ, SNVT; Curación de datos: CAHM, MEJM; Análisis formal: CAHM, MEJM; Supervisión: EYZZ, SNVT; Visualización: CAHM, MEJM; Administración del proyecto: EYZZ; Redacción – borrador original: CAHM, MEJM; Redacción – revisión y edición: SNVT; Revisión final del manuscrito: SNVT.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses financieros ni relaciones personales que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akdogan, Z., & Guven, B. (2019). Microplastics in the environment: A critical review of current understanding and identification of future research needs. *Environmental Pollution*, 254(Pt A), 113011. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113011>
- Browne, M. A., et al. (2011). Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: Sources and sinks. *Environmental Science & Technology*, 45(21), 9175–9179. <https://doi.org/10.1021/es201811s>
- Büngener, L., Galvão, A., Postila, H., & Heiderscheidt, E. (2024). Microplastic retention in green walls for nature-based and decentralized greywater treatment. *Environmental Pollution*, 363, 125047. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125047>
- Che, S., Huang, M., Zhu, L., Shen, L., Ma, Y., Wan, Z., et al. (2024). Exposure to nanopolystyrene and phoxim at ambient concentrations causes oxidative stress and inflammation in the intestines of the Chinese mitten crab. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 273, 116126. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116126>
- Chowdhury, S. R., Razzak, S. A., & Hossain, M. M. (2023). Microplastics in freshwater and drinking water: Sources, impacts, detection, and removal strategies. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06677-y>
- Enfrin, M., Dumée, L. F., & Lee, J. (2019). Nano/microplastics in water and wastewater treatment processes – Origin, impact and potential solutions. *Water Research*, 161, 621–638. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.06.049>
- Hernandez, L. M., et al. (2017). Plastic fibers in the ocean: A global assessment. *Science Advances*, 3(6), e1602814. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1602814>
- Huang, D., et al. (2021). Behavior and fate of microplastics in aquatic systems. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 126155. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126155>
- Koelmans, A. A., et al. (2019). Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment. *Water Research*, 155, 410–422. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.054>
- Li, J., Liu, H., & Chen, J. (2020). Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence and removal technologies. *Science of the Total Environment*, 734, 139161. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139161>

- Ma, B., Xue, W., Hu, C., Liu, H., Qu, J., & Li, L. (2020). Characteristics of microplastic removal via coagulation and filtration processes. *Water Research*, 181, 115876. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115876>
- Mebrat, K. W., & Mekonnen, T. H. (2026). Delignified and surface-engineered wood for microplastic removal in water treatment. *Separation and Purification Technology*, 390, 136912. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2026.136912>
- Mompó-Curell, R., et al. (2026). Microplastics separation in reject water from wastewater sludge treatment line using micro and ultrafiltration membranes. *Process Safety and Environmental Protection*, 210, 108642. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2026.108642>
- Murphy, F., Ewins, C., Carbonnier, F., & Quinn, B. (2016). Wastewater treatment works as a source of microplastics. *Environmental Science & Technology*, 50(11), 5800–5808. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05416>
- Na, S., et al. (2023). Fate and potential risks of microplastic fibers and fragments in water and wastewater treatment processes. *Journal of Hazardous Materials*, 463, 132938. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132938>
- Nizzetto, L., et al. (2016). Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? *Environmental Science & Technology*, 50(20), 10777–10779. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04140>
- Rullander, G., et al. (2023). Retention of microplastics in horizontal flow sand filters. *Journal of Environmental Management*, 344, 118690. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118690>
- Rodríguez-Narvaez, O. M., Goonetilleke, A., Perez, L., & Bandala, E. R. (2021). Engineered technologies for the separation and degradation of microplastics in water: A review. *Chemical Engineering Journal*, 414, 128692. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128692>
- Sanchez, J., et al. (2024). High removal of PS and PET microplastics using Fe₂O₃ microparticles. *Chemosphere*, 367, 143538. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143538>
- Senathirajah, K., et al. (2023). Electrocoagulation effects on microplastics. *Environmental Pollution*. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122159>
- Shen, M., et al. (2022). Advanced oxidation processes for microplastic removal. *Chemical Engineering Journal*, 430, 133130. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133130>
- Sun, J., et al. (2019). Microplastics in wastewater treatment plants. *Water Research*, 152, 21–37. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.12.050>
- Sun, P., et al. (2022). Membrane technologies for microplastic removal. *Journal of Membrane Science*, 643, 120145. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.120145>
- Ta, A. T., et al. (2025). Microplastic removal in megacity water treatment plant. *Environmental Technology & Innovation*, 40, 104478. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104478>
- Talvitie, J., et al. (2017). Microlitter removal in wastewater treatment plant. *Water Research*, 109, 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.046>
- Thathsarani, N., et al. (2025). Chitosan-based coagulation for microplastic removal. *Science of the Total Environment*, 1009, 181039. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.181039>
- Velasco, A. N., et al. (2023). Microplastics in drinking water treatment plant. *Science of the Total Environment*, 880, 163270. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163270>
- Wiśniowska, E., et al. (2024). Coagulation removal of microplastics. *Desalination and Water Treatment*. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100462>
- Wang, J., et al. (2019). Microplastics in wastewater treatment plants: Review. *Water Research*, 162, 193–208. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.06.021>
- Wang, Z., et al. (2021). Occurrence and fate of microplastics in water systems. *Water Research*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.116155>
- Wong, J. K. H., et al. (2020). Microplastics in freshwater and terrestrial environments. *Science of the Total Environment*, 708, 135216. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.135216>
- Xu, J., Zuo, R., Wu, G., Liu, J., Liu, J., Huang, C., & Wang, Z. (2024). Global distribution, drivers, and potential hazards of microplastics in groundwater: A review. *The Science Of The Total Environment*, 954, 176194. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176194>