

Advances in sampling methods for the characterisation of microplastics in river ecosystems

Avances en métodos de muestreo para la caracterización de microplásticos en ecosistemas fluviales

SALAZAR, M. R.¹; IMBACHI, R. C.²; SOLANILLA, J.F.³

¹Ph. D. Margarita del Rosario Salazar Sánchez V.

*Investigadora, Universidad del Cauca, e-mail: mdsalazar@unicauca.edu.co.
<https://orcid.org/0000-0002-3636-2922>*

²Ing. Rosmery Carolina Imbachi Hoyos. Investigadora, Programa de Ingeniería Agroindustrial, Facultad de Ingenierías, Universidad del Cauca, e-mail: rosmeryimbachi@unicauca.edu.co. <https://orcid.org/0009-0002-8380-4524>

³Ph. D. José Fernando Solanilla Duque. Profesor Titular, Programa de Ingeniería Agroindustrial, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad del Cauca, e-mail: jsolanilla@unicauca.edu.co. <https://orcid.org/0000-0001-6664-9134>

Entidad

Universidad del Cauca – Facultad de Ciencias Agrarias, Cauca, Colombia.

Tel: (602)8209900

E-mail: mdsalazar@unicauca.edu.co

Recibido: 09/11/2023 / Aceptado: 11/03/2024

Resumen

Este artículo de investigación presenta una revisión bibliográfica exhaustiva sobre los métodos de muestreo aplicados en la evaluación de microplásticos en ecosistemas fluviales. La creciente preocupación en torno a la contaminación por microplásticos en entornos acuáticos exige enfoques de muestreo rigurosos. El objetivo principal de este estudio es evaluar críticamente las metodologías existentes, destacando sus fortalezas y limitaciones. Al examinar técnicas de muestreo convencionales y emergentes, la revisión busca ofrecer recomendaciones para mejorar futuras investigaciones. A través de un análisis meticuloso de investigaciones previas, este estudio tiene como objetivo mejorar la comprensión de la presencia de microplásticos en sistemas fluviales.

Palabras clave: Micropartícula, Mesoplástico, Método, Nanopartícula, Plástico, Tendencias.

Abstract

This research article presents a comprehensive bibliographic review on sampling methods applied to the assessment of microplastics in river ecosystems. The escalating concern surrounding microplastic contamination in aquatic environments necessitates rigorous sampling approaches. The primary aim of this study is to critically evaluate existing methodologies while highlighting their strengths and limitations. By examining conventional and emerging sampling techniques, the review endeavors to provide recommendations for refining future investigations. Through a meticulous analysis of past research, this study aims to enhance the understanding of microplastic presence in river systems.

Keywords: Microparticle, Mesoplastic, Method, Nanoparticle, Plastic, Trends.

1. INTRODUCCIÓN

La creciente conciencia sobre la presencia generalizada de microplásticos en ecosistemas acuáticos ha impulsado investigaciones dirigidas a entender la complejidad de este desafío ambiental (Nolasco *et al.*, 2023). Los microplásticos, definidos como partículas plásticas con un tamaño inferior a 5 mm, han capturado la atención de la comunidad científica debido a su ubicuidad y su potencial para generar impactos ambientales significativos (Bitencourt *et al.*, 2021). Entre los ecosistemas afectados, los ríos emergen como corredores críticos en la dispersión y acumulación de estos microfragmentos plásticos.

El propósito de este artículo es examinar detalladamente la diversidad de microplásticos presentes en entornos fluviales, centrándose en su clasificación según tamaño y origen. Esta perspectiva es esencial para comprender las variadas fuentes y comportamientos de los microplásticos en los ríos, arrojando luz sobre la posible magnitud de su influencia ambiental.

En el primer apartado, se llevará a cabo una clasificación exhaustiva de los microplásticos según su tamaño, lo que permitirá establecer una base sólida para discernir entre microplásticos primarios, secundarios y fragmentados (Sorasan, 2022). Dicha categorización resulta vital para discernir las distintas vías mediante las cuales estos microplásticos ingresan y persisten en los sistemas fluviales.

En el segundo apartado, se explorarán las diversas fuentes de liberación de microplásticos en entornos fluviales. Esta comprensión es fundamental para identificar las áreas de intervención prioritaria y orientar estrategias de mitigación. Las fuentes de origen primario y secundario, que abarcan desde la

liberación directa de productos plásticos hasta la fragmentación de macroplásticos preexistentes, brindan un panorama completo de las vías mediante las cuales los microplásticos ingresan en los ríos (Burgos *et al.*, 2022).

Mediante esta revisión, el presente artículo aspira a contribuir al entendimiento del problema de los microplásticos en ríos, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones y abriendo posibilidades para abordar eficazmente la contaminación por microplásticos en estos cruciales ecosistemas acuáticos.

2. METODOLOGIA

La metodología empleada para esta revisión sistemática se fundamentó en una búsqueda exhaustiva de literatura científica en la base de datos Web of Science (Wos). Se utilizaron términos clave específicos relacionados con la caracterización de microplásticos en ecosistemas fluviales, tales como "[Microplastic AND Water OR Pollution AND Sampling]". La búsqueda se restringió a estudios publicados en español e inglés desde el año 2010 hasta el 10 de febrero de 2023.

Los criterios de inclusión para la selección de estudios fueron definidos de antemano y se aplicaron de manera rigurosa. Se incluyeron estudios que abordaban directamente la caracterización de microplásticos en ecosistemas fluviales y proporcionaban datos cuantitativos o cualitativos relevantes para comprender los procesos y resultados obtenidos. Además, se consideraron únicamente aquellos estudios disponibles en su totalidad y accesibles para su revisión.

Una vez identificados los estudios pertinentes, se procedió a la extracción sistemática de datos clave utilizando un protocolo previamente establecido. Se

recopiló información detallada sobre la metodología de muestreo utilizada en cada estudio, así como los resultados obtenidos en términos de concentraciones, tipos de microplásticos identificados y posibles tendencias de investigación.

3. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Tipos de Microplásticos y Fuentes de Contaminación en Ríos

La presencia ubícua de microplásticos en ecosistemas fluviales ha suscitado una urgente necesidad de comprender tanto sus tipologías como las múltiples fuentes de contaminación. Los microplásticos, fragmentos de plástico de menos de 5 mm de tamaño, se pueden clasificar en dos categorías principales: primarios y secundarios (Bitencourt *et al.*, 2021).

Los microplásticos Primarios son fabricados y diseñados con dimensiones pequeñas, como microperlas utilizadas en productos de cuidado personal y microfibras provenientes de textiles sintéticos (Ramírez *et al.*, 2019). Las microperlas, compuestas principalmente de polietileno y polipropileno, son liberadas en los sistemas fluviales a través de descargas de aguas residuales sin tratamiento adecuado (Weisntein *et al.*, 2016). Por otro lado, las microfibras, originadas por la fragmentación de textiles sintéticos durante el lavado, ingresan al sistema fluvial a través del efluente de plantas de tratamiento de aguas residuales (Choi *et al.*, 2022). Mientras que los microplásticos secundarios surgen como resultado de la degradación de plásticos más grandes debido a la exposición a la radiación solar, condiciones térmicas y la acción

mecánica. A medida que los plásticos se fragmentan en partículas más pequeñas, los microplásticos secundarios se liberan en el ambiente fluvial a través de diversos medios, incluidos la escorrentía de superficies urbanas y la degradación de desechos plásticos en vertederos cercanos a los ríos.

En ese contexto, las principales fuentes de liberación de microplásticos en ríos incluyen descargas industriales, sistemas de alcantarillado, efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales y desechos plásticos mal gestionados. Las partículas microplásticas pueden ser arrastradas desde fuentes terrestres, como áreas urbanas e industriales, hacia los cursos fluviales por la escorrentía superficial. Además, las actividades recreativas, la erosión de neumáticos de vehículos y la degradación de plásticos en embalses también contribuyen a la carga de microplásticos en ríos (Klavins *et al.*, 2022).

Además de los microplásticos generados por actividades humanas, también se ha observado que las partículas de microplástico pueden formarse en el medio ambiente fluvial a través de la degradación de macroplásticos y la erosión de materiales plásticos presentes en las márgenes de los ríos (Ocampo y Santa *et al.*, 2019).

3.2 Clasificación de Microplásticos según Tamaño

La clasificación de microplásticos según su tamaño constituye un elemento fundamental en la caracterización de estas partículas en ambientes acuáticos, incluyendo ríos. Los microplásticos se

dividen en varias categorías en función de su tamaño, lo que a su vez influye en su comportamiento de transporte, acumulación y potencial impacto ambiental (Casilla *et al.*, 2023). Esta categorización se basa generalmente en diámetros específicos que van desde nanómetros hasta milímetros.

Los microplásticos se agrupan en tres categorías principales: nanopartículas, microplásticos primarios y microplásticos secundarios. Las nanopartículas, con diámetros inferiores a 1 μm , a menudo se originan por la degradación física y química de plásticos más grandes, y plantean desafíos particulares debido a su capacidad de atravesar barreras biológicas y potencialmente ingresar a la cadena alimentaria.

Los microplásticos primarios, con diámetros de 1 μm a 5 mm, son diseñados y fabricados para ser de tamaño pequeño

desde su origen, como microperlas en productos cosméticos o microfibras en textiles sintéticos (Ragusa *et al.*, 2021). Estos microplásticos entran directamente al ambiente acuático y pueden ser consumidos por organismos acuáticos debido a su similitud con presas naturales, lo que puede tener efectos adversos en la salud y el comportamiento de los organismos. Y los microplásticos secundarios, con diámetros de 1 μm a 5 mm, son el resultado de la fragmentación de plásticos más grandes debido a la acción de la intemperie, el rozamiento y la degradación.

Estos microplásticos representan una fracción significativa de los contaminantes presentes en los sistemas fluviales. Su tamaño más grande puede influir en su sedimentación en los lechos de los ríos, lo que puede dar lugar a la acumulación en áreas específicas (Zaragoza *et al.*, 2022).

Tabla 1. Clasificación de Microplásticos según Tamaño

Clasificación	Diámetro (μm -mm)	Origen	Tipo de Plástico	Ref
Nanopartículas	<1	Degradación de plásticos más grandes	Polipropileno (PP) Poliestireno (PS) Poliéster (PET) Poliuretano (PU)	
Microplásticos Primarios	1-5000 μm	Fabricación, cosméticos, textiles	Varía	
Microplásticos Secundarios	1-5000 μm	Fragmentación de plásticos	Varía	

Fuente: Autores

Es esencial mencionar que la clasificación de los microplásticos por tamaño no es estática y puede variar según la definición utilizada en diferentes estudios y contextos. Además, las diferencias en los

métodos de muestreo y análisis también pueden impactar la forma en que se categorizan los microplásticos.

3.3 Clasificación de Microplásticos según Origen

La clasificación de los microplásticos según su origen es crucial para comprender la diversidad de fuentes y rutas de contaminación en los ecosistemas fluviales. Los microplásticos pueden derivar de múltiples fuentes, incluyendo fuentes terrestres y marinas, así como de actividades industriales y domésticas. Esta sección presenta una categorización detallada de los microplásticos según su origen, con ejemplos ilustrativos y sus características químicas y físicas distintivas.

3.3.1 Microplásticos Primarios

Los microplásticos primarios, también conocidos como microplásticos "nuevos", se generan intencionadamente para aplicaciones específicas, como microesferas en productos cosméticos y abrasivos en productos de limpieza (Zaragoza *et al.*, 2022). Estos microplásticos son diseñados para tener tamaños y formas específicas. Las microesferas, por ejemplo, son microplásticos esféricos con diámetros menores a 5 mm. Están compuestas principalmente de polietileno (PE) y polipropileno (PP), que les otorgan propiedades físicas adecuadas para sus funciones previstas. Su origen directo y controlado facilita su identificación y cuantificación en estudios de muestreo.

3.3.2 Microplásticos Secundarios o Fragmentados

Los microplásticos secundarios son fragmentos generados por la degradación de objetos plásticos más grandes, como bolsas, botellas y envases. Estos microplásticos son variados en forma y

tamaño, generalmente en el rango de 5 mm a menos de 1 μm . La degradación ambiental, exposición a radiación ultravioleta y factores mecánicos contribuyen a la fragmentación. Polímeros comunes como polietileno tereftalato (PET) y polietileno de alta densidad (HDPE) están presentes en microplásticos fragmentados, con superficies rugosas debido a la fragmentación (Aldana *et al.*, 2022).

3.3.3 Microplásticos Secundarios por Desgaste de Neumáticos

Una fuente emergente de microplásticos son los generados por el desgaste de neumáticos en carreteras. Partículas diminutas de caucho, que contienen una matriz polimérica reforzada con negro de humo y otros aditivos, se liberan durante la fricción. Estos microplásticos a menudo tienen una apariencia negruzca y están compuestos de una mezcla compleja de polímeros, incluyendo caucho sintético, estireno-butadieno y otros compuestos (Castañeta *et al.*, 2020).

3.3.4 Microplásticos Textiles

La liberación de microfibras durante el lavado de prendas de vestir y textiles sintéticos constituye una fuente importante de microplásticos en ríos. Estas microfibras, generalmente de poliéster, nylon y acrílico, tienen longitudes variables y diámetros de alrededor de 10 μm . Su origen textil se refleja en la presencia de tintes y acabados en su superficie, que la diferencia de otros tipos de microplásticos (Kim & Lee *et al.*, 2020).

3.4 Métodos de Muestreo Tradicionales: Ventajas y Limitaciones

La evaluación precisa de la presencia y concentración de microplásticos en sistemas fluviales requiere una selección cuidadosa de métodos de muestreo que reflejen de manera fiable la distribución de estos contaminantes en el entorno acuático. Los métodos de muestreo tradicionales, como las redes de plancton, el arrastre de superficie y la sedimentación, han sido ampliamente empleados para este propósito. A continuación, se presenta una descripción detallada de estos métodos, junto con un análisis crítico de sus ventajas y limitaciones.

3.4.1 Redes de Plancton: Las redes de plancton, originalmente diseñadas para recolectar organismos biológicos en suspensión, han sido adaptadas para la captura de microplásticos. Estas redes consisten en mallas de tamaño predefinido, generalmente en el rango de micrómetros, que permiten el paso de agua pero retienen las partículas en función de su tamaño. En el caso de microplásticos, las mallas tienden a capturar partículas más grandes, a menudo excluyendo microplásticos menores a 300 micrómetros. La duración del muestreo suele ser de varias horas para acumular suficientes partículas y obtener una muestra representativa. Las redes de plancton se usan generalmente en la capa superior del agua y capturan principalmente microplásticos de superficie (Calbet *et al.*, 2022).

3.4.2 Arrastre de Superficie: El método de arrastre de superficie implica el desplazamiento de una malla en la superficie del agua para recoger partículas flotantes, incluidos los microplásticos. Aunque este método puede proporcionar

una visión inicial de la presencia de microplásticos en la capa superior del agua, su eficacia puede verse afectada por factores como la velocidad del agua y las condiciones climáticas. Además, este enfoque tiende a subestimar la concentración de microplásticos sumergidos en el cuerpo de agua.

3.4.3 Sedimentación: El método de sedimentación implica la recogida de partículas suspendidas en una columna de agua a medida que se depositan en el fondo. Aunque es adecuado para evaluar microplásticos en sedimentos, su aplicabilidad en la detección de microplásticos en la columna de agua es limitada. Los microplásticos pueden requerir tiempos prolongados para sedimentar, lo que dificulta la captura precisa de su distribución vertical y horizontal (Luque *et al.*, 2023).

3.5 Análisis de su aplicabilidad en la detección de microplásticos y posibles sesgos

La evaluación meticulosa de los métodos de muestreo tradicionales en relación con la detección de microplásticos revela tanto ventajas sustanciales como posibles sesgos que pueden influir en la interpretación precisa de los resultados. A pesar de su amplia adopción en estudios iniciales, estos métodos presentan desafíos intrínsecos que requieren atención minuciosa en futuras investigaciones.

En el contexto de la detección de microplásticos, los métodos de muestreo tradicionales como las redes de plancton, el arrastre de superficie y la sedimentación han demostrado ser herramientas valiosas

en la caracterización inicial de la presencia de partículas de plástico en ecosistemas acuáticos. Sin embargo, es imperativo reconocer que estos métodos se originaron en la investigación de la biota y partículas de mayor tamaño, lo que puede generar sesgos en la cuantificación de microplásticos de dimensiones submilimétricas.

Un factor crítico a considerar es la selectividad inherente de los métodos tradicionales. Las redes de plancton, diseñadas para la captura de organismos vivos, pueden pasar por alto microplásticos más pequeños que la malla de filtración. Del mismo modo, el arrastre de superficie podría subestimar la concentración real de microplásticos debido a su incapacidad para capturar partículas sumergidas o adheridas a sedimentos. Esto puede llevar a una subestimación significativa de la carga de microplásticos en los ríos.

Además, la evaluación cuantitativa y cualitativa de microplásticos mediante estos métodos tradicionales puede estar influenciada por la variabilidad de la hidrodinámica fluvial. Las corrientes turbulentas pueden alterar la distribución y concentración de microplásticos en el agua, lo que podría introducir sesgos espaciales y temporales en los datos recopilados. Asimismo, la posible interacción entre microplásticos y componentes naturales de los ríos, como sedimentos y materia orgánica, podría afectar la eficacia del muestreo y la precisión de los resultados.

Si bien los métodos de muestreo tradicionales son valiosos en la detección inicial de microplásticos en ríos, es

esencial reconocer sus limitaciones y sesgos potenciales. La extrapolación directa de los datos obtenidos a la estimación general de la contaminación por microplásticos podría resultar en subestimaciones significativas. Se sugiere encarecidamente la adopción de enfoques complementarios y la incorporación de técnicas más específicas para microplásticos en investigaciones futuras, a fin de obtener una imagen más precisa y completa de la presencia y el impacto de estas partículas en los ecosistemas fluviales.

3.6 Avances en Métodos de Muestreo

En el ámbito de la evaluación de microplásticos en ecosistemas fluviales, la búsqueda constante de técnicas más precisas y eficientes ha impulsado el desarrollo y la adopción de enfoques emergentes de muestreo. Esta sección detalla tres metodologías prometedoras: la filtración por membrana, la extracción de microplásticos con solventes y la fluorescencia inducida por láser (LIF, por sus siglas en inglés).

3.6.1 Filtración por Membrana: La filtración por membrana se ha posicionado como un método de muestreo relevante para la recolección de microplásticos en muestras acuáticas. Implicando la forzada separación de partículas mediante una membrana con porosidad controlada, esta técnica permite la captura selectiva de microplásticos de diferentes tamaños. Las membranas de distintos materiales, como poliéster y policarbonato, se utilizan para adaptarse a la variedad de tipos de microplásticos (Castellanos *et al.*, 2020).

3.6.2 Extracción de Microplásticos con Solventes: La extracción de microplásticos con solventes emerge como una alternativa valiosa para el enriquecimiento de partículas de microplásticos en muestras acuáticas. Basado en el principio de extracción química, este método involucra la disolución de la matriz acuosa utilizando solventes orgánicos. Los microplásticos liberados son luego recuperados y cuantificados (Angulo *et al.*, 2023). Aunque presenta ventajas en términos de alta recuperación, es esencial considerar la posible contaminación cruzada y la representatividad de las muestras.

3.6.3 Fluorescencia Inducida por Láser (LIF): La fluorescencia inducida por láser, una técnica basada en la espectroscopía, ha ganado atención como enfoque de detección no invasivo de microplásticos en el agua. La LIF se fundamenta en la excitación de las partículas mediante radiación láser, generando fluorescencia característica. La técnica permite la identificación cualitativa de microplásticos a través de su firma espectral, sin embargo, la cuantificación precisa puede verse limitada por la variabilidad de las propiedades físicas y químicas de los microplásticos (García *et al.*, 2007).

3.7 Evaluación de su eficacia en la recolección de microplásticos en diferentes matrices acuáticas

La recolección efectiva de microplásticos en diversas matrices acuáticas es una preocupación esencial para la evaluación precisa de la contaminación y la comprensión de los impactos potenciales en los ecosistemas fluviales. La elección de métodos de muestreo apropiados y

eficaces es crucial para garantizar resultados representativos y comparables entre diferentes estudios y localizaciones geográficas. En este apartado, se discuten los avances en las técnicas de recolección de microplásticos y su adaptabilidad a diferentes contextos acuáticos.

3.7.1 Filtración por Membrana y Extracción de Microplásticos con Solventes: La filtración por membrana y la extracción de microplásticos con solventes se han destacado como enfoques prometedores para la recolección de partículas plásticas en matrices acuáticas. La filtración por membrana se basa en el tamizado de partículas a través de una membrana de porosidad controlada, lo que permite la retención selectiva de microplásticos mientras se descartan los materiales más grandes (Valverde, 2022). Por otro lado, la extracción con solventes implica la disolución de la matriz acuática en solventes específicos que disuelven los componentes orgánicos, dejando atrás los microplásticos.

3.7.2 Microscopía y Espectroscopía en la Identificación de Microplásticos Recolectados: Una vez recolectados, los microplásticos necesitan ser identificados y caracterizados para determinar su tamaño, forma y composición. La microscopía óptica y electrónica de barrido se utilizan para visualizar los microplásticos y proporcionar información detallada sobre su morfología. La espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) y Raman permiten la identificación de los tipos de plásticos presentes en función de sus espectros de absorción o dispersión únicos (Valverde, 2022).

3.7.3 Adaptabilidad a Diferentes Matrices

Acuáticas: La eficacia de los métodos de recolección varía según las características de la matriz acuática en consideración (Campanale *et al.*, 2022). En aguas superficiales, la filtración por membrana puede ser adecuada para la recolección de microplásticos suspendidos. En sedimentos fluviales, las técnicas de extracción con solventes pueden permitir la recuperación de microplásticos incrustados (Rani *et al.*, 2023). La aplicación de técnicas de recolección debe considerar la naturaleza de la matriz, la densidad de los microplásticos y la posibilidad de contaminación cruzada.

3.8 Desafíos Analíticos y Cuantificación de Microplásticos

La identificación y cuantificación precisas de microplásticos en muestras ambientales representan un desafío analítico significativo en la investigación de la contaminación por microplásticos en ecosistemas fluviales (Lv *et al.*, 2021). Estos minúsculos fragmentos de polímeros sintéticos requieren métodos

analíticos avanzados debido a su diversidad de formas, tamaños y composiciones. La selección y aplicación de las técnicas adecuadas son esenciales para garantizar resultados confiables y representativos.

Una de las principales dificultades en la identificación de microplásticos radica en su tamaño, ya que pueden variar desde nanómetros hasta milímetros. Métodos de microscopía, como la microscopía electrónica de barrido (SEM) y la microscopía de fuerza atómica (AFM), han demostrado ser valiosos en la observación y caracterización de microplásticos individuales en muestras ambientales (Mariano *et al.*, 2021). Sin embargo, estas técnicas pueden resultar limitadas en términos de velocidad y eficiencia para el análisis de grandes volúmenes de muestras (Ver tabla 2).

Tabla 2. Consideración de técnicas de espectroscopía, microscopía y análisis químico.

Técnica	Descripción y Aplicación	Ventajas	Limitaciones
Espectroscopía Raman	Esta técnica se basa en la interacción de la radiación láser con los microplásticos, generando espectros de dispersión Raman característicos.	No destructiva, identificación de polímeros y aditivos específicos.	Restricciones en la detección de microplásticos de tamaño muy pequeño.
Microscopía de Fluorescencia	Emplea microscopios de fluorescencia para identificar microplásticos con etiquetas fluorescentes.	Alta especificidad, visualización directa de partículas.	Requiere etiquetado previo de microplásticos con sondas fluorescentes.
Espectroscopía de Infrarrojo (FTIR)	Mide la absorción de infrarrojo por grupos funcionales en la estructura	Identificación precisa de polímeros y	Limitada capacidad para identificar microplásticos muy

	del polímero, permitiendo la identificación.	mezclas.	pequeños.
Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)	Proporciona imágenes de alta resolución para identificar microplásticos según sus características morfológicas.	Alta resolución, posibilidad de caracterización morfológica.	Requiere preparación previa de muestras, no es útil para microplásticos de tamaño nanométrico.
Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS)	Permite la detección de microplásticos mediante la detección de elementos metálicos presentes en algunos aditivos.	Sensibilidad para microplásticos con aditivos metálicos.	No es aplicable a microplásticos que carecen de aditivos metálicos.

Fuente: Autores

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y la espectrometría de masas con espectrometría de tiempo de vuelo (TOF-MS) han surgido como enfoques prometedores para la identificación de microplásticos basada en sus propiedades químicas y espectrales (Zhang *et al.*, 2023). La espectroscopía FTIR permite la identificación de grupos funcionales característicos en los polímeros, mientras que la TOF-MS facilita la determinación precisa de las masas moleculares de los microplásticos, lo que contribuye a su clasificación y seguimiento.

En cuanto a la cuantificación de microplásticos, la fluorescencia inducida por láser (LIF) y la cromatografía de exclusión por tamaño (SEC) han ganado popularidad (Veerasingam *et al.*, 2021). La LIF se basa en la emisión de fluorescencia por los microplásticos cuando son excitados por un láser. Este método permite la detección y cuantificación rápida de microplásticos en muestras, pero la disponibilidad de fluorocromos adecuados es esencial para lograr resultados precisos.

La SEC, por otro lado, separa los microplásticos según su tamaño y puede ser acoplada a técnicas espectrométricas para una cuantificación más precisa. Sin embargo, la calibración y la disponibilidad de estándares son factores críticos que influyen en la exactitud de la cuantificación (Dong *et al.*, 2023).

3.9 Impacto Ambiental y Potenciales Soluciones

3.9.1 Efectos de los microplásticos en la salud del ecosistema fluvial: La presencia creciente de microplásticos en los ecosistemas fluviales ha suscitado preocupaciones sobre su impacto potencial en la salud ambiental y la biodiversidad acuática (Kumar *et al.*, 2021). Los microplásticos, definidos como partículas de plástico de menos de 5 mm de tamaño, pueden ser ingeridos por una amplia gama de organismos acuáticos, desde zooplancton hasta peces y crustáceos, lo que desencadena consecuencias en cascada en la red trófica (Guzzetti *et al.*, 2018; Harmon *et al.*, 2024).

3.9.2 Bioacumulación y Transferencia

Trófica: Los microplásticos, al ser confundidos con partículas de alimento, pueden ser ingeridos por organismos filtradores y depredadores (Yin *et al.*, 2024). Estos microplásticos pueden acumularse en el tracto digestivo y tejidos de los organismos, provocando alteraciones en su metabolismo, reproducción y desarrollo (Thacharodi *et al.*, 2024). Por ejemplo, investigaciones han demostrado que larvas de peces expuestas a microplásticos pueden presentar deformidades morfológicas y retardos en el crecimiento (Rong *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2024).

3.9.3 Contaminación Química y Biotransferencia:

Los microplásticos pueden adsorber compuestos químicos tóxicos presentes en el agua, como pesticidas y contaminantes orgánicos persistentes (Khoshraftar *et al.*, 2024). Cuando los organismos ingieren microplásticos contaminados, estos químicos pueden liberarse en sus tejidos, lo que resulta en la biotransferencia de sustancias dañinas a lo largo de la cadena alimentaria (Nguyen *et al.*, 2024). Esto no solo amenaza la salud de los organismos acuáticos, sino que también puede afectar a los animales y seres humanos que se alimentan de ellos.

3.9.4 Alteración del Hábitat y Biodiversidad:

La acumulación de microplásticos en los sedimentos fluviales puede alterar la estructura del hábitat acuático y afectar la composición de las comunidades biológicas (Chomiak *et al.*, 2024). Los microplásticos pueden interactuar con microorganismos y afectar la función de los ecosistemas acuáticos (Ren *et al.*, 2024). Por ejemplo,

la formación de agregados microplásticos puede afectar la filtración de agua y la disponibilidad de recursos para los organismos bentónicos.

3.9.5 Potenciales Soluciones:

Para abordar los desafíos planteados por la contaminación de microplásticos en ríos, se requiere una combinación de medidas preventivas y de mitigación (Ahmed *et al.*, 2024). Estrategias de reducción de plásticos de un solo uso, regulaciones más estrictas sobre la gestión de residuos y la promoción de la economía circular son vitales para prevenir la entrada de más microplásticos en el ambiente acuático (Bharti *et al.*, 2024). Además, la investigación y el desarrollo de técnicas de remediación, como sistemas de filtración mejorados y tecnologías de remoción de microplásticos en plantas de tratamiento de aguas residuales (Nasir *et al.*, 2024), pueden contribuir a la minimización de la contaminación.

3.10 Consideración de estrategias para mitigar la contaminación por microplásticos

La mitigación efectiva de la contaminación por microplásticos en entornos fluviales y acuáticos representa un desafío ambiental apremiante (Li *et al.*, 2024). Dada la ubicuidad y persistencia de los microplásticos, se requiere una combinación de estrategias integrales para abordar este problema. En esta sección, se exploran diversas estrategias y enfoques que han sido propuestos y aplicados para reducir la entrada y dispersión de microplásticos en ríos y cursos de agua.

3.10.1 Prevención en la Fuente: La prevención en la fuente se enfoca en reducir la producción y liberación de microplásticos desde su origen. Esto incluye medidas como la regulación y restricción de microesferas de plástico en productos cosméticos y de cuidado personal (Jani *et al.*, 2024). Además, la promoción de prácticas de gestión de residuos sólidos y la educación pública sobre la importancia de minimizar el uso de plásticos de un solo uso también son enfoques valiosos.

3.10.2 Filtración en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales: La implementación de sistemas de filtración avanzados en plantas de tratamiento de aguas residuales puede retener partículas de microplásticos presentes en las aguas residuales antes de su descarga en cuerpos de agua (Komorowska & Marciniak, 2024). Técnicas como la filtración por membrana y la coagulación-floculación seguida de sedimentación, han demostrado eficacia en la retención de microplásticos y otros contaminantes.

3.10.3 Remoción en Sedimentos y Riberas: La remoción física de microplásticos depositados en sedimentos y riberas puede disminuir su liberación al agua (Fuchs *et al.*, 2024). La implementación de barreras flotantes y trampas en puntos de entrada estratégicos puede interceptar microplásticos antes de que se dispersen en el cuerpo de agua (Wu *et al.*, 2024). Además, la limpieza periódica de riberas y áreas de acumulación de desechos también contribuye a reducir la carga de microplásticos.

3.10.4 Aplicación de Tecnologías de Tratamiento Avanzado: Tecnologías emergentes, como la oxidación avanzada y la adsorción en materiales nanomodificados, muestran promesa en la degradación y adsorción selectiva de microplásticos en aguas residuales. La investigación en este ámbito está en curso, con un enfoque en la eficacia, viabilidad técnica y seguridad ambiental de estas tecnologías.

3.10.5 Fomento de la Economía Circular: El enfoque de la economía circular promueve la reutilización y el reciclaje de materiales plásticos, reduciendo la producción y el uso de nuevos plásticos. La implementación de sistemas de reciclaje avanzados y la promoción de productos de plástico reciclado pueden contribuir a disminuir la demanda de nuevas resinas plásticas y, por ende, la liberación de microplásticos.

Un ejemplo destacado de mitigación exitosa es la prohibición de microesferas de plástico en productos cosméticos en varios países, lo que ha reducido significativamente la entrada de estos microplásticos en los cursos de agua (Pastorino, 2024; Idowu *et al.*, 2024). Además, ciudades costeras han implementado trampas flotantes en los sistemas de drenaje pluvial para interceptar microplásticos antes de que lleguen al océano (Vasal *et al.*, 2024).

3.11 Recomendaciones para Futuras Investigaciones

3.11.1 Propuesta de enfoques combinados para abordar las limitaciones de los métodos de muestreo actuales: La caracterización precisa y exhaustiva de

microplásticos en entornos fluviales constituye un desafío multidimensional debido a la complejidad de las matrices acuáticas y las variaciones en las propiedades físicas y químicas de los microplásticos. Con el propósito de avanzar en la calidad y confiabilidad de los resultados, se sugiere encarecidamente la adopción de enfoques de muestreo combinados que fusionen las ventajas de diferentes técnicas, superando las limitaciones inherentes de cada enfoque individual.

Una propuesta concreta para la mejora de la eficacia de muestreo es la integración de la filtración por membrana con la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) (Fakayode *et al.*, 2024). La filtración por membrana, conocida por su capacidad para concentrar partículas en el agua, podría ser seguida por un análisis NIR. La espectroscopía NIR, basada en la interacción de la radiación electromagnética con los enlaces moleculares, permite identificar y cuantificar compuestos químicos en función de sus firmas espectrales. Al combinar la filtración por membrana con la espectroscopía NIR, se lograría no solo la concentración de partículas microplásticas, sino también la identificación precisa de los polímeros presentes. Esto es esencial para determinar la composición de microplásticos, lo que a su vez proporciona información relevante sobre sus fuentes de origen y posibles efectos ambientales.

Además, se recomienda explorar la incorporación de sensores de fluorescencia en las campañas de muestreo (Ateia *et al.*, 2024). Los

sensores de fluorescencia se basan en la emisión de luz fluorescente por parte de los microplásticos cuando son excitados con una fuente de luz adecuada. Esta técnica es altamente sensible a la presencia de microplásticos y puede detectar partículas incluso en concentraciones bajas. La utilización de sensores de fluorescencia permitiría una monitorización en tiempo real y una detección más rápida de la presencia de microplásticos en los cuerpos de agua, lo que resulta especialmente útil en investigaciones a corto plazo o en situaciones de alta variabilidad temporal.

No obstante, es crucial destacar que la implementación exitosa de enfoques combinados requerirá una cuidadosa planificación experimental y validación. La selección adecuada de las técnicas a fusionar, la definición de protocolos estandarizados y la consideración de los factores ambientales y geográficos son pasos fundamentales para garantizar la fiabilidad y la comparabilidad de los resultados entre estudios.

3.11.2 *Identificación de áreas de investigación necesarias para mejorar la precisión y la comprensión del problema:*

En el contexto de abordar la creciente preocupación en torno a la presencia y efectos de los microplásticos en ecosistemas fluviales, resulta imperativo identificar áreas de investigación que promuevan una comprensión más profunda y precisa de esta problemática. Estas áreas de enfoque potenciarán la capacidad de diseñar y aplicar estrategias de muestreo más efectivas y con fundamentos científicos sólidos. A continuación, se exponen algunas de estas áreas cruciales:

3.11.3 Distribución Vertical y Horizontal de Microplásticos: Las investigaciones actuales se han centrado predominantemente en la superficie del agua y los sedimentos. Sin embargo, se requiere una consideración más detallada de la distribución vertical y horizontal de los microplásticos en las columnas de agua y a lo largo de las orillas de los ríos (De Arbeloa *et al.*, 2024; Schreyers *et al.*, 2024). Esto implica la implementación de muestreos a diferentes profundidades y distancias desde las fuentes potenciales de contaminación.

3.11.4 Caracterización Avanzada de Microplásticos: Para una comprensión exhaustiva, es necesario analizar los microplásticos en términos de sus características físicas y químicas, incluyendo tamaño, forma, composición polimérica y aditivos. Las técnicas avanzadas de análisis, como la espectrometría de masas de alta resolución y la espectroscopía infrarroja, pueden proporcionar una caracterización detallada y diferenciada de los distintos tipos de microplásticos presentes en los ecosistemas fluviales.

3.10.5 Efectos Ecológicos y Toxicológicos a Largo Plazo: Comprender los impactos a largo plazo de los microplásticos en los ecosistemas fluviales es esencial para evaluar adecuadamente su influencia en la salud de las especies acuáticas y la biodiversidad en general. Investigar los efectos crónicos y subletales, así como el transporte de microplásticos a través de la cadena trófica, permitirá discernir el alcance completo de sus consecuencias ecológicas.

3.11.6 Desarrollo de Técnicas de Muestreo Innovadoras: La evolución continua de las técnicas de muestreo es fundamental para capturar con precisión la presencia y concentración de microplásticos en los ríos. Explorar métodos como la filtración por membrana y la captura pasiva utilizando dispositivos flotantes puede mejorar la eficiencia y representatividad de los muestreos (Logvina *et al.*, 2024).

3.11.7 Modelado de Transporte y Acumulación de Microplásticos: La modelización matemática y numérica puede ser una herramienta valiosa para comprender el transporte y la acumulación de microplásticos en sistemas fluviales (Xing *et al.*, 2024). Integrar datos de caudales, corrientes y propiedades de microplásticos en modelos hidrodinámicos puede ayudar a predecir patrones de dispersión y áreas de acumulación (Bravo *et al.*, 2022).

3.11.8 Desarrollo de Métodos de Extracción Eficiente: La recuperación efectiva de microplásticos de muestras ambientales es crucial para obtener datos confiables. Investigar y mejorar los métodos de extracción, como la digestión enzimática y la separación magnética, puede aumentar la eficiencia de recuperación y minimizar las pérdidas.

En resumen, el avance en la investigación de microplásticos en ríos requiere un enfoque multidisciplinario que aborde áreas cruciales para una comprensión completa del problema. Estas áreas de investigación identificadas proporcionan una hoja de ruta esencial para la generación de conocimiento científico sólido y el diseño de estrategias efectivas

para la mitigación y gestión de la contaminación por microplásticos en ecosistemas fluviales.

4. CONCLUSIONES

La caracterización exhaustiva de la variedad de microplásticos según su origen y sus características químicas y físicas es esencial para una evaluación precisa de su impacto ambiental y para el diseño de estrategias de muestreo y análisis efectivas en sistemas fluviales.

La continua evolución en la investigación de microplásticos ha propiciado la exploración y adopción de métodos de muestreo más avanzados. La filtración por membrana, la extracción con solventes y la fluorescencia inducida por láser presentan enfoques novedosos y complementarios. Cada método exhibe ventajas y limitaciones específicas, y la elección adecuada debe considerar la naturaleza de la muestra, los objetivos del estudio y la disponibilidad de recursos. Estos avances en metodologías de muestreo enriquecen la comprensión de la distribución y abundancia de microplásticos en ríos y contribuyen a una evaluación más precisa de su impacto ambiental.

Los microplásticos ejercen una influencia compleja y multifacética en los ecosistemas fluviales, amenazando la salud de la biota acuática y la integridad de los hábitats. La comprensión de estos efectos es esencial para informar políticas de gestión y tomar medidas efectivas hacia la conservación de la calidad ambiental de los ríos y cuerpos de agua dulce.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, S. F., Islam, N., Tasannum, N., Mehjabin, A., Momtahn, A., Chowdhury, A. A., ... & Mofijur, M. (2024). Microplastic removal and management strategies for wastewater treatment plants. *Chemosphere*, 347, 140648.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140648>
- Aldana Aranda, D., Enríquez Díaz, M., & Castillo Escalante, V. (2022). Ciencia-Contaminación por microplásticos. *Revista Ciencia*, (73), 6–68.
https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/73_2/PDF/Ciencia_73-2.pdf
- Angulo-Olmos, G., Álvarez-Pliego, N., Sánchez, A. J., Florido, R., Salcedo, M. Á., Garrido-Mora, A., & Cruz-Rámirez, A. K. (2023). Microfibers in the gut of invasive armored catfish (*Pterygoplichthys* spp.) (Actinopterygii: Siluriformes: Loricariidae) in an urban lake in the floodplain of the Grijalva River basin, Mexico. *Acta Ichthyologica et Piscatoria*, 53, 81-88.
<https://doi.org/10.3897/aiep.53.102643>
- Ateia, M., Wei, H., & Andreescu, S. (2024). Sensors for Emerging Water Contaminants: Overcoming Roadblocks to Innovation. *Environmental Science & Technology*.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.3c09889>
- Bharti, S., Sharma, V. P., Kumar, R., & Das, P. (2024). Scenario of Microplastics Waste in the Ecosystem: Strategies Toward Monitoring and Management. In *Remediation of Plastic and Microplastic Waste* (pp. 141-159). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781003449133>

- Bitencourt Belo IC, Penido de Andrade BN, Araújo Miranda JP, Drumond PC. microplásticos, seus impactos no ambiente e maneiras biodegradáveis de substituição. *Revista Internacional de Ciências*. 2021 Aug 31;11(2):214–28.
<https://doi.org/10.12957/ric.2021.54481>
- Bravo, P. L. V., Córdova-Mosquera, R. A., & Delgado, E. A. R. (2022). Modelación del flujo de microplásticos y la interacción de contaminantes químicos orgánicos en sistemas acuáticos. *Revista Colón Ciencias, Tecnología y Negocios*, 9(2), 69-91.
https://revistas.up.ac.pa/index.php/revista_colon_ctn
- Burgos Aceves, M. A., Betancourt Lozano, M., González Mille, D. J., & Ilizaliturri Hernández, C. A. (2022). Micropartículas plásticas: Una aparente diminuta amenaza a la vida. *Naturaleza y Tecnología*, 3-10.
<http://www.naturalezaytecnologia.com/index.php/nyt/article/view/411/microplasticos>
- Calbet Fabregat A. (2022). El plancton y las redes tróficas marinas. *Los Libros de La Catarata*. Editorial CSIC. Consejo Superior de Investigación. 90p.
<https://acortar.link/zOrP2k>
- Campanale, C., Savino, I., Pojar, I., Massarelli, C., & Uricchio, V. F. (2020). A practical overview of methodologies for sampling and analysis of microplastics in riverine environments. *Sustainability*, 12(17), 6755.
<https://doi.org/10.3390/su12176755>
- Casillas, G., Hubbard, B. C., Telfer, J., Zarate-Bermudez, M., Muianga, C., Zarus, G. M., et al. (2023). Microplastics Scoping Review of Environmental and Human Exposure Data. *Microplastics*, 2(1), 78–92.
<https://doi.org/10.3390/microplastics2010006>
- Castañeta, G., Gutiérrez, A. F., Nacaratte, F., & Manzano, C. A. (2020). Microplastics: a contaminant that grows in all environmental areas, its characteristics and possible risks to public health from exposure. *Revista Boliviana de Química*, 37(3), 142-157.
<http://www.bolivianchemistryjournal.org>
- Castellanos, J. L., Espinar, S. O., & Bernal, J. B. (2020). Emergentes y ubicuos: microplásticos en aguas residuales y EDAR. *Monitorización de cuatro EDAR en la Región de Murcia*. *Tecnoagua*, (45), 60-70.
- Choi S, Kim J, Kwon M. The Effect of the Physical and Chemical Properties of Synthetic Fabrics on the Release of Microplastics during Washing and Drying. *Polymers (Basel)*. 2022 Aug 1;14(16).
<https://doi.org/10.3390/polym14163384>
- Chomiak, K. M., Owens-Rios, W. A., Bangkong, C. M., Day, S. W., Eddingsaas, N. C., Hoffman, M. J., ... & Tyler, A. C. (2024). Impact of Microplastic on Freshwater Sediment Biogeochemistry and Microbial Communities Is Polymer Specific. *Water*, 16(2), 348.
<https://doi.org/10.3390/w16020348>
- De Arbeloa, N. P., & Marzadri, A. (2024). Modeling the transport of microplastics along river networks. *Science of The Total Environment*, 911, 168227.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168227>
- Dong, H., Wang, X., Niu, X., Zeng, J., Zhou, Y., Suona, Z., ... & Chen, X. (2023). Overview of analytical methods for the determination of microplastics: Current status and trends. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 117261.

- <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117261>
- Fakayode, S. O., Mehari, T. F., Fernand Narcisse, V. E., Grant, C., Taylor, M. E., Baker, G. A., ... & Anum, D. (2024). Microplastics: Challenges, toxicity, spectroscopic and real-time detection methods. *Applied Spectroscopy Reviews*, 1-95. <https://doi.org/10.1080/05704928.2024.2311130>
- Fuchs, Y., Scherbaum, S., Huber, R., R  ther, N., & Hartlieb, A. (2024). Removing Plastic Waste from Rivers: A Prototype-Scale Experimental Study on a Novel River-Cleaning Concept. *Water*, 16(2), 248. <https://doi.org/10.3390/w16020248>
- García, E. M., Vélez, R. R., López, P. R., & de la Rosa Vázquez, J. (2007). Development of a spectrometer controlled by a PC. *Científica*, 11(3), 149-154. <https://www.redalyc.org/pdf/614/61411308.pdf>
- Guzzetti, E., Sureda, A., Tejada, S., & Faggio, C. (2018). Microplastic in marine organism: Environmental and toxicological effects. *Environmental toxicology and pharmacology*, 64, 164-171. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2018.10.009>
- Harmon, S. M., Chen, Q., Ma, C., Ji, M., Yan, X., Ji, R., & Shi, H. (2024). The effects of microplastic pollution on aquatic organisms. In *Microplastic contamination in aquatic environments* (pp. 355-379). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15332-7.00001-6>
- Idowu, G. A., Orij, A. Y., Olorunfemi, K. O., Sunday, M. O., Sogbanmu, T. O., Bodunwa, O. K., ... & Aiyesanmi, A. F. (2024). Why Nigeria should ban Single-use Plastics: Excessive Microplastic Pollution of the water, sediments and fish species in Osun River, Nigeria. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 100409. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100409>
- Jani, V., Wu, S., & Venkiteshwaran, K. (2024). Advancements and Regulatory Situation in Microplastics Removal from Wastewater and Drinking Water: A Comprehensive Review. *Microplastics*, 3(1), 98-123. <https://doi.org/10.3390/microplastics3010007>
- Khosraftar, Z., & Ghaemi, A. (2024). Adsorption of organic pollutants from pesticides using polymeric adsorbents. In *Polymeric Adsorbents* (pp. 461-512). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99746-1.00007-0>
- Klavins, M., Klavins, L., Stabnikova, O., Stabnikov, V., Marynin, A., Ansone-Bertina, L., et al. (2022). Interaction between microplastics and pharmaceuticals depending on the composition of aquatic environment. *Microplastics*, 1(3), 520-535. <https://doi.org/10.3390/microplastics1030037>
- Komorowska-Kaufman, M., & Marciniak, W. (2024). Removal of microplastic particles during municipal wastewater treatment: a current review. *Desalination and Water Treatment*, 100006. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100006>
- Kim, H., & Lee, J. Y. (2020). Emerging concerns about microplastic pollution on groundwater in South Korea.

- Sustainability, 12(13), 5275.
<https://doi.org/10.3390/su12135275>
- Li, K., Du, L., Qin, C., Bolan, N., Wang, H., & Wang, H. (2024). Microplastic pollution as an environmental risk exacerbating the greenhouse effect and climate change: a review. *Carbon Research*, 3(1), 9.
<https://doi.org/10.1007/s44246-023-00097-7>
- Logvina, Y., Matas, I. M., Ribeiro, H., Pinto da Silva, L., Rodrigues, P., Leitão, J., & da Silva, J. E. (2024). Micro-and Nanoplastics in the Atmosphere: Methodology for Microplastics Size-Fractionation Sampling. *Microplastics*, 3(1), 82-97.
<https://doi.org/10.3390/microplastics3010006>
- Luque-Fernández, C. R., Alcelay, I., Villegas Paredes, L., & Bocardo-Delgado, E. (2023). First approach to microplastics occurrence in sandy beaches in the province of Islay (Arequipa), southern Peru. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 39.
<https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/54664>
- Lv, L., Yan, X., Feng, L., Jiang, S., Lu, Z., Xie, H., ... & Li, C. (2021). Challenge for the detection of microplastics in the environment. *Water Environment Research*, 93(1), 5-15.
<https://doi.org/10.1002/wer.1281>
- Mariano, S., Tacconi, S., Fidaleo, M., Rossi, M., & Dini, L. (2021). Micro and nanoplastics identification: classic methods and innovative detection techniques. *Frontiers in toxicology*, 3, 636640. doi: 10.3389/ftox.2021.636640
- Nasir, M. S., Tahir, I., Ali, A., Ayub, I., Nasir, A., Abbas, N., ... & Hamid, K. (2024). Innovative technologies for removal of micro plastic: A review of recent advances. *Heliyon*, e25883.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25883>
- Nguyen, D. T., Le, X. T. T., Van Trinh, T., & Van Do, M. (2024). Evaluation of chemical exposure to the sediment and green mussels (*Perna viridis*) at some coastal sites in Northern Vietnam. *Regional Studies in Marine Science*, 103413.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103413>
- Nolasco Banegas, M. E., Saboia, L., Barros, Y., da Silva Lemos, V. A., Barbosa de Oliveira, A. H., Bastos Vidal, C., et al. (2023). Microplastics and nanoplastics in the aquatic environment: Contamination, determination and interaction with other contaminants. *Periódico Tchê Química*, 20(43), 58–92.
http://dx.doi.org/10.52571/PTQ.v20.n43.2023_05_CAVALCANTE_pgs_58_92.pdf
- Ocampo, M., & Santa Catarina, C. (2019). Plásticos en los océanos. *INCyTU Of. Inf. Científica y Tecnología para el Congr. la Unión*, (34), 6.
https://foroconsultivo.org.mx/INCyTU/documentos/Completa/INCYTU_19-034.pdf
- Pastorino, P. (2024). Sunscreens and micro (nano) plastics: Are we aware of these threats to the Egyptian coral reefs?. *Science of The Total Environment*, 910, 168587.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168587>
- Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, V., Carnevali, O., et al. (2021). Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment*

- International, 146.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>
- Ramírez, J., Alcañiz, L., Hernández, S., Lincon, E., & Fernández, S. (2019). Minimización de microfibras en ciclo de vida de los productos textiles y en el tratamiento de aguas residuales: Proyecto Fiberclean. *Tecnoaqua*, 36, 53-57.
- Rani, M., Ducoli, S., Depero, L. E., Prica, M., Tubić, A., Ademovic, Z., ... & Federici, S. (2023). A complete guide to extraction methods of microplastics from complex environmental matrices. *Molecules*, 28(15), 5710.
<https://doi.org/10.3390/molecules28155710>
- Ren, Y., Qi, Y., Wang, X., Duan, X., & Ye, X. (2024). Effects of microplastics on litter decomposition in wetland soil. *Environmental Pollution*, 343, 123145.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123145>
- Rong, W., Chen, Y., Xiong, Z., Zhao, H., Li, T., Liu, Q., ... & Liu, S. (2024). Effects of combined exposure to polystyrene microplastics and 17 α -Methyltestosterone on the reproductive system of zebrafish. *Theriogenology*, 215, 158-169.
<https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2023.12.004>
- Schreyers, L. J., Van Emmerik, T. H., Bui, T. K. L., van Thi, K. L., Vermeulen, B., Nguyen, H. Q., ... & van der Ploeg, M. (2024). River plastic transport affected by tidal dynamics. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(3), 589-610.
<https://doi.org/10.5194/hess-28-589-2024>
- Sorasan, C., Edo, C., González-Pleiter, M., Fernández-Piñas, F., Leganés, F., Rodríguez, A., & Rosal, R. (2022). Ageing and fragmentation of marine microplastics. *Science of The Total Environment*, 827, 154438.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154438>
- Thacharodi, A., Meenatchi, R., Hassan, S., Hussain, N., Bhat, M. A., Arockiaraj, J., ... & Pugazhendhi, A. (2024). Microplastics in the environment: a critical overview on its fate, toxicity, implications, management, and bioremediation strategies. *Journal of Environmental Management*, 349, 119433.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119988>
- Valsan, G., Warriar, A. K., Anusree, S., Tamrakar, A., Khaleel, R., & Rangel-Buitrago, N. (2024). Seasonal variation of microplastics in tropical mangrove waters of South-western India. *Regional Studies in Marine Science*, 69, 103323.
<https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.103323>
- Valverde, J. G. S. (2022). Monitoreo y caracterización de microplásticos en arenas de playas y aguas costeras de Costa Rica. *Revista Internacional de Comunicación y Desarrollo (RICD)*, 4(17).
<https://doi.org/10.15304/ricd.4.17.8807>
- Veerasingam, S., Ranjani, M., Venkatachalapathy, R., Bagaev, A., Mukhanov, V., Litvinyuk, D., ... & Vethamony, P. (2021). Contributions of Fourier transform infrared spectroscopy in microplastic pollution research: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51(22), 2681-2743.
<https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1807450>
- Wang, H., Xu, J., Yuan, Y., Wang, Z., Zhang, W., & Li, J. (2024). The

- Exploration of Joint Toxicity and Associated Mechanisms of Primary Microplastics and Methamphetamine in Zebrafish Larvae. *Toxics*, 12(1), 64. <https://doi.org/10.3390%2Ftoxics12010064>
- Weinstein, J. E., Crocker, B. K., & Gray, A. D. (2016). From macroplastic to microplastic: Degradation of high-density polyethylene, polypropylene, and polystyrene in a salt marsh habitat. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 35(7), 1632–1640. <https://doi.org/10.1002/etc.3432>
- Wu, J., Chen, H., Xu, J., Rahman, M. S. U., Li, S., Wang, J., ... & Liu, Y. (2024). The lull before microplastics pollution outbreaks: Some implications for human health and control strategies. *Nano Today*, 54, 102062. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2023.102062>
- Xing, L., Liu, H., & Bolster, D. (2024). Statistical-physical method for simulating the transport of microplastic-antibiotic compound pollutants in typical bay area. *Environmental Pollution*, 123339. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123339>
- Yin, J., Duan, C., Zhou, F., Gong, L., Gunathilaka, M. L., Liu, X., ... & Pan, Y. (2024). Microplastics affect interspecific interactions between cladoceran species in the absence and presence of predators by triggering asymmetric individual responses. *Water Research*, 248, 120877. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120877>
- Zaragoza Estrada A, Estrada Monje A, Zaragoza Contreras EA. Presencia y diseminación en el medio ambiente. 2022.
- Zhang, J., Fu, D., Feng, H., Li, Y., Zhang, S., Peng, C., ... & Wang, L. (2023). Mass spectrometry detection of environmental microplastics: Advances and challenges. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 117472. <https://doi.org/10.33064/iycuaa2023884100>