



Recibido: 1 de enero 2026 / Aceptado: 10 de febrero del 2026 / Publicado: 02 de abril 2026

Área: Ciencias de la Salud

Artículo de revisión

CAPÍTULO 3

Impacto de los microplásticos en la fauna de agua dulce: Una revisión sistemática

The Impact of Microplastics on Freshwater Fauna: A Systematic Review

Hernandez N., Medina M.
DOI: 10.55204/pmea.134.c212**Noelia Meliza Hernandez Aparcana, 0000-0002-9348-0642** Universidad Nacional San Luis de Gonzaga, Facultad de Ciencias Biológicas. Av. Los maestros
S/N Ciudad Universitaria 11001, Código Postal: 11001, Ica, Ica. Perúnoelia.hernandez@unica.edu.pe**Merici Ingrid Medina Guerrero, 0000-0003-0728-9997** Universidad Nacional San Luis de Gonzaga, Facultad de Ciencias Biológicas. Av. Los maestros
S/N Ciudad Universitaria 11001, Código Postal: 11001, Ica, Ica. Perúingrid.medina@unica.edu.pe

Resumen

Introducción: La contaminación por microplásticos representa una amenaza emergente y persistente para la biodiversidad de los ecosistemas dulceacuícolas, afectando la salud y estabilidad de diversos organismos acuáticos continentales.

Objetivo: Analizar sistemáticamente el impacto biológico de los microplásticos en la fauna de agua dulce reportado en la literatura científica de alto impacto durante la última década.

Métodos: Se realizó una revisión sistemática bajo la metodología PRISMA. La búsqueda se efectuó en bases de datos indexadas en Scopus, seleccionando 28 investigaciones originales que cumplieron con criterios de rigor científico sobre efectos fisiológicos, taxonómicos y morfológicos en fauna de agua dulce.

Resultados: Los hallazgos confirman que los microplásticos inducen estrés oxidativo, inflamación tisular y neurotoxicidad. Se identificó a los organismos filtradores e invertebrados bentónicos como los grupos de mayor sensibilidad. Asimismo, se determinó que las microfibras y fragmentos irregulares provocan daños orgánicos significativamente más severos que las microesferas, actuando además como vectores de contaminantes químicos.

Conclusiones: La exposición a microplásticos constituye un riesgo sistémico que compromete la aptitud biológica de la fauna dulceacuícola. Es imperativo integrar la diversidad morfológica de los polímeros en los protocolos de monitoreo ambiental y fortalecer la regulación para preservar la integridad de estos ecosistemas.

Palabras Clave: Microplásticos; aguas dulces; fauna; ecotoxicología; contaminantes ambientales; cadena alimenticia.

Abstract:

Introduction: Microplastic pollution poses an emerging and persistent threat to the biodiversity of freshwater ecosystems, affecting the health and stability of various freshwater organisms.

Objective: To systematically analyze the biological impact of microplastics on freshwater fauna as reported in high-impact scientific literature over the past decade.

Methods: A systematic review was conducted using the PRISMA methodology. The search was performed in databases indexed in Scopus, selecting 28 original studies that met criteria of scientific rigor regarding physiological, taxonomic, and morphological effects on freshwater fauna.

Results: The findings confirm that microplastics induce oxidative stress, tissue inflammation, and neurotoxicity. Filter-feeding organisms and benthic invertebrates were identified as the most sensitive groups. Furthermore, it was determined that microfibers and irregular fragments cause significantly more severe organ damage than microspheres, while also acting as vectors for chemical contaminants.

Conclusions: Exposure to microplastics constitutes a systemic risk that compromises the biological fitness of freshwater fauna. It is imperative to integrate the morphological diversity of polymers into environmental monitoring protocols and to strengthen regulations to preserve the integrity of these ecosystems.

menticia.

Keywords: Microplastics; freshwater; fauna; ecotoxicology; environmental pollutants; food chain.

1. INTRODUCCIÓN

En la contaminación por microplásticos se ha consolidado como una de las amenazas más ubicuas para la integridad de los ecosistemas de agua dulce a nivel global. Según Valentí-Muelas (1), la acumulación de estos polímeros en cuencas hidrográficas ha superado las proyecciones iniciales, convirtiendo a los ríos en los principales vectores de transporte hacia el océano. La fragmentación de macroplásticos en partículas menores a 5 mm dificulta su remoción mediante procesos naturales de sedimentación (2). Asimismo, la persistencia de estos materiales en el lecho fluvial altera las propiedades fisicoquímicas del hábitat bentónico, afectando la base de la cadena alimenticia (3,4). Finalmente, la gestión actual de residuos es insuficiente para contener la carga de microfibras que ingresan diariamente a los cuerpos de agua continentales (5,6).

La fauna dulceacuícola presenta mecanismos de interacción directa con estas partículas, principalmente a través de la ingestión accidental por confusión con presas naturales. Los organismos filtradores, como ciertos bivalvos, presentan las tasas más altas de retención de microesferas en sus tejidos blandos (7,8). Así mismo, se observa que en peces teleósteos la ingestión ocurre mayoritariamente durante la fase de forrajeo activo en la columna de agua (9). Adicionalmente, se destaca que la morfología de la partícula sea fibra, fragmento o película, determina el tiempo de residencia del plástico dentro del tracto digestivo del animal (10). Esta exposición constante genera un riesgo de saciedad falsa que reduce la ingesta calórica necesaria para el crecimiento (11).

Desde una perspectiva química, los microplásticos actúan como esponjas moleculares que adsorben contaminantes orgánicos persistentes presentes en el agua. La alta relación superficie-volumen de las micropartículas facilita la adherencia de metales pesados y pesticidas (12,13). Por otro lado, los aditivos químicos añadidos durante la fabricación del plástico, como los ftalatos, se lixivian directamente en el sistema circulatorio de la fauna tras la ingestión (14). Diversos experimentos demuestran que esta mezcla de contaminantes externos e internos potencia la toxicidad sistémica de manera sinérgica (15). Complementariamente, el pH del sistema digestivo de los organismos acelera la liberación de estos compuestos nocivos, agravando el cuadro clínico del espécimen (16).

Los efectos fisiológicos derivados de esta contaminación son multivariados y afectan el rendimiento biológico de las especies expuestas. La presencia de microplásticos induce un estado de estrés oxidativo severo, dañando las membranas celulares a nivel

epitelial (17). Mientras tanto, se han identificado alteraciones significativas en las enzimas metabólicas que regulan el almacenamiento de energía en el hígado de los peces (18). La inflamación crónica del tracto intestinal es la consecuencia mecánica más recurrente, lo que puede derivar en obstrucciones letales (19,20). Por último, se resalta que incluso concentraciones bajas de polímeros pueden comprometer la respuesta inmunológica de la fauna, haciéndola más susceptible a enfermedades parasitarias (21).

A nivel reproductivo y poblacional, la evidencia científica sugiere consecuencias que podrían comprometer la biodiversidad a largo plazo. La exposición temprana a microplásticos durante el desarrollo embrionario reduce las tasas de eclosión en anfibios (22). En una línea similar, los cambios en el comportamiento de natación y escape, inducidos por la neurotoxicidad plástica, aumentan la tasa de depredación sobre las especies juveniles (23). Finalmente, la pérdida de individuos clave por toxicidad plástica desestabiliza las funciones ecológicas del ecosistema, como el ciclo de nutrientes (24).

Pese a la creciente producción científica, existe una necesidad crítica de sintetizar los hallazgos para establecer marcos de protección legal más robustos. La falta de protocolos estandarizados de muestreo en agua dulce impide una comparación precisa entre diferentes regiones geográficas (25). La integración de datos ecotoxicológicos es el único camino para definir límites máximos permitidos de plásticos en cuerpos de agua (26).

En ese sentido, la indagación tiene como objetivo general analizar sistemáticamente el impacto biológico de los microplásticos en la fauna de agua dulce reportado en la literatura científica de alto impacto durante la última década. Para alcanzar este propósito, se establecen los siguientes objetivos específicos: 1) Categorizar los principales efectos biológicos (físicos y químicos) documentados en diversas especies acuáticas continentales; 2) Identificar los grupos taxonómicos que presentan una mayor sensibilidad ante la exposición a polímeros; y 3) Evaluar la relación entre las características físicas de los microplásticos y la severidad del daño orgánico observado en la fauna.

2. METODOLOGÍA

Este estudio adoptó la metodología PRISMA (Elementos preferidos para la elaboración de revisiones sistemáticas y metaanálisis), la cual proporciona un marco estructurado que facilita la selección ordenada y rigurosa de artículos científicos, asegurando transparencia y exhaustividad en el proceso (27). La aplicación de este

protocolo permite garantizar la replicabilidad del análisis y la validez de los hallazgos biológicos obtenidos mediante un método objetivo.

El proceso de localización de literatura se realizó exclusivamente en la base de datos de alto impacto Scopus. Esta plataforma fue seleccionada por su exhaustiva cobertura de literatura científica revisada por pares y su relevancia indiscutible en los campos de las ciencias biológicas, ecotoxicología y gestión ambiental a nivel global.

Para garantizar la recuperación de estudios pertinentes, se aplicó una cadena de búsqueda avanzada bajo el esquema: TITLE-ABS-KEY ("microplastic*" AND "freshwater fauna" AND ("impact*" OR "effect*") AND NOT "marine"). Esta estrategia permitió integrar descriptores técnicos en inglés para maximizar el alcance y precisión de la búsqueda, asegurando la identificación de investigaciones de alto nivel que aborden específicamente el ecosistema de agua dulce.

El periodo de análisis se acotó a las publicaciones realizadas entre el 2021 y 2025, con el propósito de capturar la evidencia científica más reciente sobre un fenómeno de contaminación emergente que ha experimentado transformaciones críticas en la última década. Los resultados de la búsqueda inicial se filtraron bajo criterios estrictos de inclusión y exclusión (Véase la Tabla 1).

Tabla 6.

Criterio de inclusión y exclusión

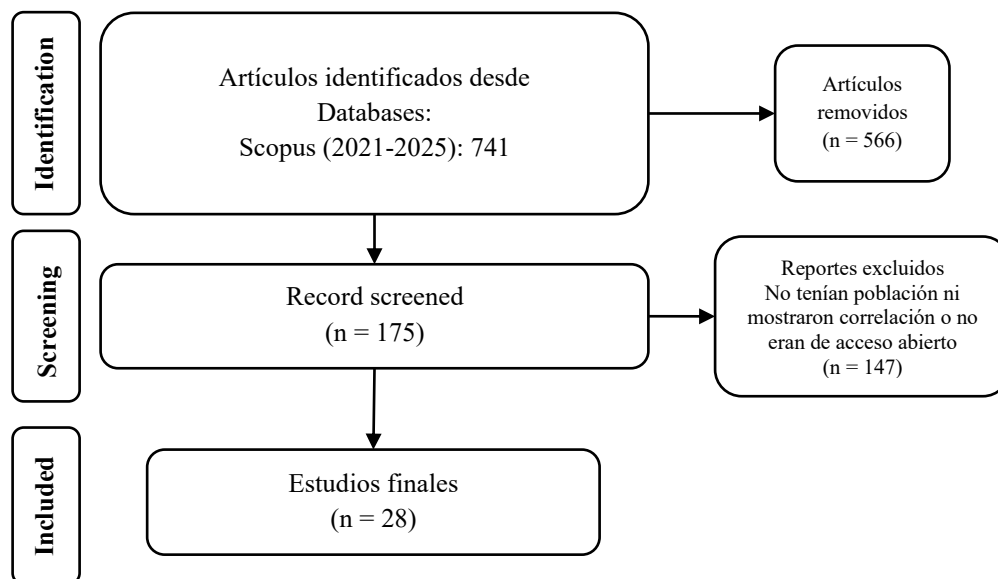
Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Investigaciones pertenecientes al periodo entre 2015 y 2025.	Investigaciones para optar a grado académico (tesis) o de repositorios institucionales.
Investigaciones en idiomas inglés o español.	Investigaciones en idiomas distintos al inglés o español.
Investigaciones de acceso abierto con texto completo disponible para su análisis.	Investigaciones de pago o sin acceso al documento íntegro.
Investigaciones centradas en fauna de agua dulce (peces, macroinvertebrados, moluscos) y el impacto de microplásticos.	Investigaciones que no abordan directamente el nexo entre microplásticos y efectos biológicos o que se centran en entornos marinos.
Investigaciones indexadas en la base de datos Scopus.	Investigaciones incompletas, cartas al editor, resúmenes de congresos o literatura ambigua.

Para garantizar el rigor científico, se procedió a la evaluación de la calidad metodológica de los artículos seleccionados mediante las herramientas de lectura crítica adecuadas para estudios experimentales y observacionales. Este proceso de evaluación

asegura que la síntesis de evidencia presentada posee una base sólida para sustentar las aplicaciones prácticas y futuras líneas de investigación derivadas de este trabajo.

Figura 6.

Flujograma Prisma de selección de investigaciones para revisión



Como se visualiza en la Figura 1, El flujograma evidencia un proceso riguroso de selección de estudios para la revisión sistemática. Inicialmente, se identificaron 741 artículos en bases de datos, de los cuales 566 fueron excluidos en la primera fase, quedando 175 registros para evaluación. Posteriormente, tras el proceso de cribado, se descartaron 147 estudios por no cumplir con criterios de inclusión, como la ausencia de población de interés o falta de acceso abierto. Finalmente, se incluyeron 28 investigaciones, lo que refleja una depuración progresiva y criteriosa orientada a garantizar la calidad y pertinencia de la evidencia analizada.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis sistemático de la literatura evidencia una relación significativa entre el agotamiento crónico del personal de salud y el deterioro de los estándares de seguridad en la atención. Los hallazgos se presentan a continuación, articulando de manera integrada la evidencia cualitativa y cuantitativa proveniente de los 28 estudios examinados.

Tabla 7.

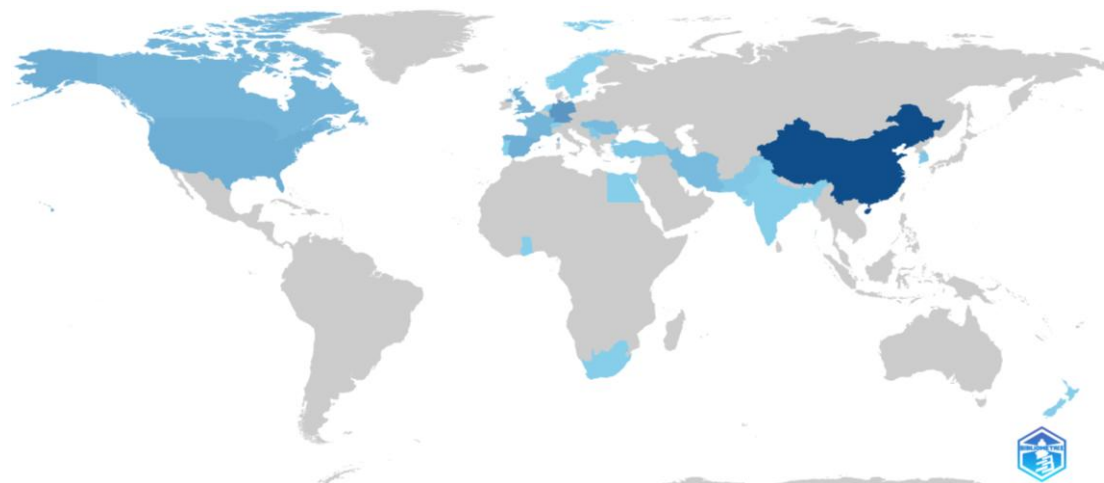
Investigaciones analizadas

N.º	Autores	Objetivos	Resultados
1	Martínez et al. (28)	El estudio comparó los impactos físicos de microplásticos de polietileno (HDPE) y ácido poliláctico	La exposición al PLA aumentó el crecimiento de los caracoles medido como masa final y elevó el contenido de fósforo en sus tejidos.

		(PLA) en el caracol de agua dulce <i>Radix balthica</i> .	
2	Sebteoui et al. (29)	La investigación analizó cómo el tamaño de las partículas de microplásticos influye en la actividad de bioturbación de las larvas de <i>Chironomus riparius</i> .	Las partículas pequeñas se transportaron rápidamente en etapas iniciales, mientras que el tratamiento mixto (TM) mostró recuentos significativamente mayores de partículas en capas sedimentarias profundas ($p < 0.05$).
3	Michon et al. (30)	El trabajo midió la contaminación por microplásticos en el agua y en cuatro especies de peces del sistema del río y estuario de San Lorenzo.	El rayón fue el polímero dominante representando el 41% en agua y entre el 40% y 100% en peces, siendo la captación branquial la vía principal en piscívoros grandes.
4	Garcia-Garin et al. (31)	El estudio evaluó la distribución estacional de macro-basura y microplásticos en el Delta del Ebro y el riesgo de exposición para aves marinas.	Las densidades de basura alcanzaron picos máximos en otoño y primavera, identificando zonas de alto riesgo donde las densidades de aves se solapaban con puntos críticos de desechos.
5	Kwon et al. (32)	La investigación examinó las respuestas proteómicas y bioquímicas inmediatas de <i>Daphnia magna</i> tras una exposición de corto plazo al poliestireno.	La exposición de 48 horas provocó la regulación a la baja de proteínas metabólicas energéticas y elevó marcadores de estrés oxidativo como la superóxido dismutasa y la catalasa.
6	Kong et al. (33)	El experimento cuantificó el efecto de las propiedades de los microplásticos en comunidades microbianas y funciones ecosistémicas en microcosmos de agua dulce.	La presencia de microplásticos incrementó la abundancia microbiana y la respiración del ecosistema, aunque la presencia de invertebrados consumidores tuvo efectos más fuertes (11% a 313%).
7	Li et al. (34)	El estudio evaluó la ingestión y los efectos tóxicos de fibras de microplásticos derivadas de esponjas de melamina en el zooplancton <i>Daphnia magna</i> .	La exposición crónica de 21 días redujo la supervivencia al 52% con una concentración de 20 mg/L y estimuló una mayor producción de descendencia.
8	Ma et al. (35)	La investigación analizó si la degradación de microplásticos intestinales afecta la transferencia de genes de resistencia a antibióticos en invertebrados bentónicos.	Se demostró que la degradación de plásticos en el intestino de larvas de Chironomidae promovió la transferencia horizontal de genes de resistencia mediante una respuesta SOS.
9	Abbas et al. (36)	El meta-análisis global evaluó la toxicidad de microplásticos y nanoplásticos sobre diversos rasgos de salud y aptitud biológica en insectos.	Los microplásticos afectaron significativamente la supervivencia (-1.17), el crecimiento (-0.69) y el desarrollo (-0.69), siendo la supervivencia el rasgo más perjudicado.
10	Zhou et al. (37)	El estudio comparó los impactos toxicológicos de fibras y microesferas plásticas solas o combinadas con ftalato de dibutilo en peces cebra.	Las fibras plásticas causaron mayor estrés oxidativo y daño tisular que las microesferas, aumentando la actividad de la catalasa hepática en un 67.8%.
11	Doria et al. (38)	La investigación investigó cómo el tamaño de partícula del microplástico impulsa la expresión génica y la pérdida de aptitud en <i>Chironomus riparius</i> .	La exposición crónica redujo las tasas diarias de crecimiento poblacional entre un 2.3% y un 7.6%, indicando una pérdida de aptitud considerable independientemente del material.
12	Horváth et al. (39)	El experimento evaluó el efecto de la ingesta de microplásticos de poliestireno en el comportamiento de toma de riesgos del crustáceo terrestre <i>Armadillidium vulgare</i> .	Los individuos expuestos mostraron un aumento en la toma de riesgos y una correlación positiva significativa (0.71) entre el tipo conductual y la predictibilidad del comportamiento.
13	Ramsperger et al. (40)	El estudio identificó las vías de internalización celular de microplásticos con eco-corona de	Las partículas de agua dulce se internalizan por macropinocitosis y fagocitosis, mientras

		diferentes entornos en macrófagos de ratón.	que las de agua salada utilizan principalmente la vía de la macropinocitosis.
14	Van der Plas et al. (41)	La investigación evaluó los impactos a largo plazo de microplásticos y nanoplásticos en comunidades de invertebrados usando identificación morfológica y ADN ambiental.	El eDNA metabarcoding detectó cambios sutiles y transitorios en la composición de la comunidad y una reducción temporal de la riqueza de taxones en el tratamiento de 15 µm.
15	Shahriar et al. (42)	El trabajo examinó los impactos combinados de un pesticida organofosforado y microplásticos de poliamida en la salud del bagre rayado.	La co-exposición aumentó la glucosa sanguínea a 143.89 mg/dL, redujo la supervivencia al 80% y provocó daños histopatológicos severos en branquias, hígado y riñones.
16	Martin et al. (43)	Investigar la exposición a microplásticos y su relación con la condición corporal en polluelos de mirlo acuático en paisajes antropogénicos.	Se detectaron microplásticos en el 62.5% de las nidadas, predominando las fibras (77.7%) y observándose una relación positiva entre la concentración fecal y el índice de masa escalado.
17	Cheung et al. (44)	Evaluar las interacciones químicas y los efectos biológicos de plásticos petroquímicos y de base biológica con retardantes de llama y solventes en un sistema pez-parásito.	El PVC solo y el PHA con aditivos inhibieron significativamente el comportamiento alimentario e incrementaron la mortalidad de los peces, mientras que el DMSO aumentó la carga parasitaria (30 gusanos de media frente a 20 en el control).
18	Mattson y Allen (45)	Evaluar los cambios en el comportamiento y la mortalidad de larvas de pez de cabeza gorda expuestas a lixiviados de partículas de desgaste de neumáticos.	El lixiviado de 14 días causó la mayor tasa de mortalidad y afectó significativamente la velocidad y aceleración de natación, con una CL50 calculada en aproximadamente el 76%.
19	Teng et al. (46)	Analizar la acumulación y neurotoxicidad de nanoplásticos de poliestireno con diferentes cargas superficiales en el pez cebra durante un ciclo de vida completo.	La exposición causó daños cerebrales y alteraciones en el comportamiento, con una acumulación en el cerebro de machos de 4.56 veces para PS-NH ₂ y de 6.57 veces en hembras.
20	Wolinski et al. (47)	Comparar el potencial de mejillones marinos y de agua dulce como biomonitores de concentraciones de microplásticos en condiciones de laboratorio.	Los mejillones marinos mostraron altas tasas de depuración (88% a 97%), mientras que los de agua dulce presentaron una depuración moderada (0% a 71%) y una acumulación no lineal.
21	Barros et al. (48)	Evaluar los impactos conjuntos de nanoplásticos y contaminación por metales en procesos ecosistémicos de agua dulce como la descomposición de hojarasca.	La contaminación por metales redujo la descomposición en un 17%, pero combinada con nanoplásticos la reducción alcanzó el 24% y la alimentación de invertebrados disminuyó hasta un 47%.
22	Wolinski et al. (7)	Evaluar los efectos de la exposición a altas concentraciones de microplásticos en la supervivencia y el estado de salud de mejillones dreisénidos.	La exposición prolongada redujo significativamente el índice de condición y el contenido de lípidos, los cuales fueron aproximadamente 1.5 veces menores que en el grupo control tras dos semanas.
23	Marelja et al. (49)	Estudiar los impactos especie-específicos de microplásticos fibrosos en el comportamiento, la supervivencia y el estrés oxidativo del zooplancton de agua dulce.	El enredo en fibras redujo drásticamente la velocidad de natación en <i>T. platyurus</i> e incrementó los niveles de especies reactivas de oxígeno (ROS) al ser expuestos a 1000 ítems/mL.
24	Mensah et al. (50)	Determinar los efectos letales y subletales de plastificantes comunes en peces y camarones de agua dulce expuestos a concentraciones ambientalmente relevantes.	Los tres plastificantes afectaron la mortalidad, siendo el DBP el más tóxico con una CL50 a 96 horas de 0.0005 mg/L para peces y 0.0003 mg/L para camarones.

25	Rasta et al. (51)	Investigar cómo las condiciones hidrodinámicas modulan la acumulación y toxicidad de microplásticos en la carpa herbívora.	El flujo de alta velocidad aumentó significativamente la acumulación de microplásticos en branquias e intestino, exacerbando la patología tisular y la expresión de genes inmunes como IL-6 y TNF- α .
26	Turhan et al. (52)	Evaluar los efectos individuales y combinados de la deltametrina y microplásticos de polietileno en el desarrollo y respuestas bioquímicas de <i>Xenopus laevis</i> .	La deltametrina mostró alta embriotoxicidad con un índice teratogénico de 8.97, mientras que los microplásticos potenciaron sinérgicamente la actividad de la enzima catalasa en los embriones.
27	Hassan et al. (53)	Caracterizar la distribución y abundancia de microplásticos en agua, sedimentos y fauna del río Nilo en el Alto Egipto.	El bagre africano presentó la mayor abundancia de microplásticos en el canal alimentario (13.1 partículas/ind.) y el cangrejo de río en las branquias (hasta 28.7 partículas/ind.).
28	Gheorgh e et al. (54)	Analizar los efectos ecotoxicológicos agudos y crónicos de una mezcla de microplásticos de poliestireno en la carpa común <i>Cyprinus carpio</i> .	La exposición crónica de 75 días inhibió la actividad de la acetilcolinesterasa en el cerebro y músculo en un 80-90% e incrementó la expresión proteica total en el intestino en un 90%.

Figura 7.*Distribución geográfica de la literatura*

La Figura 2, representa la distribución geográfica de los estudios incluidos en la revisión, evidenciando una concentración predominante en Asia, especialmente en China, país que presenta la mayor intensidad. Asimismo, se observa una participación relevante de países de Europa y América del Norte, mientras que en otras regiones como África, América Latina y Oceanía la producción es más limitada y dispersa. Esta distribución sugiere una mayor generación de evidencia en contextos con sistemas de investigación más consolidados, así como posibles brechas en la representación de otras realidades regionales.

El mapa temático muestra que los “microplásticos” se consolidan como tema motor, con alta centralidad y desarrollo, evidenciando su papel dominante en la investigación. En una posición intermedia se ubican estudios experimentales (“article”,

La red de coocurrencia evidencia que “microplastic” y “water pollutant” constituyen los nodos centrales del campo, articulando tres clústeres principales. El primero (rojo) se asocia con “toxicity”, “metabolism” y “oxidative stress”, enfocado en efectos biológicos; el segundo (verde) con “fresh water”, “environmental monitoring” y “chemistry”, orientado al análisis ambiental; y el tercero (azul) con “animal”, “plastic” y “ecotoxicology”, vinculado a estudios experimentales en organismos. Esta estructura refleja un enfoque multidisciplinario con fuerte interconexión entre evaluación ambiental y efectos toxicológicos.

Impactos fisiológicos, bioquímicos y moleculares

La inducción de estrés oxidativo es un mecanismo universal de toxicidad. Se ha observado un aumento significativo en la actividad de enzimas antioxidantes como la catalasa (CAT) y la glutatión S-transferasa (GST) en modelos de peces como el pez cebra, donde la exposición a microfibras (MFs) incrementó la CAT en un 67.8% (37). Asimismo, análisis proteómicos en *Daphnia magna* revelaron la regulación al alza de 66 proteínas vinculadas a la respuesta a especies reactivas de oxígeno (ROS) y estímulos externos tras exposiciones de corto plazo (32). Diversas indagaciones indican que los plastificantes lixiviados, como el bisfenol-A (BPA) y el ftalato de dibutilo (DBP), alteran la peroxidación lipídica (LPx) y la actividad de la acetilcolinesterasa (AChE) en invertebrados acuáticos (50).

Desempeño reproductivo, crecimiento y supervivencia

La aptitud biológica se ve comprometida por reducciones drásticas en la fecundidad. En el díptero *Chironomus riparius*, la exposición a mezclas de polímeros redujo la fertilidad significativamente (38). De igual manera, los microplásticos de melamina afectan la producción de crías y aumentan la tasa de malformaciones en la descendencia de crustáceos (34). A nivel global, meta-análisis en insectos confirman declives en la supervivencia y el crecimiento, con impactos que se extienden a polinizadores esenciales (36). En caracoles de agua dulce, se ha documentado que la ingestión de plásticos convencionales y biodegradables altera la composición isotópica de los tejidos ($\delta^{13}C$ y $\delta^{15}N$), sugiriendo cambios en la asimilación de nutrientes y el crecimiento (28).

Daño histopatológico y dinámica de acumulación

Los MPs provocan daños estructurales severos, principalmente en el tracto gastrointestinal y las branquias. En la carpa herbívora (*Ctenopharyngodon idella*), la

interacción entre MPs y la velocidad del flujo del agua exagera la elongación de filamentos branquiales y reduce el grosor de las capas mucosa y muscular del intestino (51). La morfología de la partícula es crítica: las microfibras muestran una mayor tasa de acumulación y toxicidad en comparación con las microesferas debido a su capacidad de enredo físico (30,37). Además, en ambientes lóticos, los macroinvertebrados bentónicos facilitan la dispersión de estas partículas hacia capas profundas del sedimento mediante procesos de bioturbación (29).

Neurotoxicidad y respuestas conductuales

Las alteraciones en el sistema nervioso se manifiestan en cambios de locomoción y audacia. Exposiciones a NPs con diferentes cargas superficiales provocan daño en la barrera hematoencefálica y neuroinflamación en peces, con respuestas que varían según el sexo del organismo (46). En anfípodos y peces, los lixiviados de partículas de neumáticos (TWP) inducen periodos prolongados de inmovilidad y reducen la velocidad natatoria (45). Por otro lado, en isópodos terrestres como *Armadillidium vulgare*, la ingestión de MPs incrementa las conductas de toma de riesgo, haciendo a los individuos más audaces y predecibles (39).

Efectos sinérgicos y dinámica del ecosistema

Los MPs actúan como vectores de contaminantes químicos y biológicos. La co-exposición con plaguicidas como la deltametrina o el fenitrotión amplifica la letalidad y las malformaciones embrionarias en anfibios y peces (42,52). Asimismo, la presencia de plásticos en el intestino de invertebrados promueve la transferencia de genes de resistencia a antibióticos (ARGs) entre bacterias, exacerbando los riesgos para la salud pública (35). En el ámbito ecológico, la colonización de plásticos por comunidades microbianas ("eco-corona") facilita su internalización celular en macrófagos y altera procesos ecosistémicos como la descomposición de hojarasca y el ciclo del carbono (48,40).

Área de Impacto	¿Qué se observó?	Autores
Defensas y daño celular	Los organismos activan defensas contra el daño en sus células (estrés oxidativo), aumentando enzimas protectoras en el hígado e intestino.	(54) (32) (50) (37)
Nacimiento y crías	Se producen menos crías, los nacimientos se retrasan y aumentan las malformaciones en los embriones (como colas dobladas).	(36) (38) (34) (52)
Salud de órganos	Daños físicos y heridas internas en branquias, riñones e intestino. Se reduce el grosor de las paredes intestinales y la salud general.	(28) (51) (42) (7)
Formas de nadar y actuar	Los peces nadan más lento o de forma errática. Algunos animales se vuelven más "audaces" o arriesgados ante el peligro.	(39) (45) (46)
Peligro por mezclas	Los plásticos actúan como imanes que potencian la toxicidad de venenos (pesticidas) y metales pesados en el agua.	(48) (42) (52)

Bacterias e infecciones	Desequilibrio de las bacterias "buenas" del intestino y aumento de genes que hacen a las bacterias resistentes a los antibióticos.	(35) (51)
Entorno y animales guía	Se usan aves, caracoles y bivalvos como "termómetros" para medir cuánta basura plástica hay en ciudades y ríos.	(31) (53) (43)
Daño en el cerebro	Las partículas más pequeñas logran cruzar las barreras del cerebro, causando inflamación y cambios en el sistema nervioso.	(46)

Discusión

El análisis sistemático realizado confirma que el impacto biológico de los microplásticos (MPs) en la fauna de agua dulce es un fenómeno multidimensional que trasciende la mera obstrucción física, afectando niveles fisiológicos, reproductivos y conductuales. Los resultados revelan que la exposición crónica a estos polímeros desencadena respuestas sistémicas, como el estrés oxidativo severo y la inhibición de enzimas metabólicas clave, lo que compromete la homeostasis energética de los organismos. Esta evidencia sugiere que la contaminación por plásticos en ecosistemas continentales actúa como un factor de presión biológica constante que degrada la salud de los especímenes a largo plazo, reduciendo su capacidad de respuesta ante otros estresores ambientales.

Estos hallazgos convergen con lo planteado inicialmente por Valentí-Muelas (1), quien señala que la acumulación de polímeros en cuencas hidrográficas ha superado las proyecciones iniciales, intensificando el riesgo para la biota. Mientras que estudios previos se centraban en la ingestión accidental, investigaciones recientes como las de Abbas et al. (36) y Gheorghe et al. (54) demuestran efectos más profundos, incluyendo neurotoxicidad y alteraciones de la aptitud biológica. Al contrastar estos resultados, se observa una transición en la literatura científica desde un enfoque descriptivo de la presencia de plásticos hacia una comprensión mecanística de su toxicidad celular, lo que valida la necesidad de marcos de protección legal basados en límites ecotoxicológicos.

La categorización de los daños permite distinguir entre efectos mecánicos directos y alteraciones químicas indirectas, siendo la inflamación del tracto gastrointestinal y el daño branquial las consecuencias físicas más recurrentes. Desde la perspectiva química, los MPs operan como "esponjas moleculares" que adsorben metales pesados y plaguicidas, potenciando la toxicidad mediante un efecto sinérgico tras la ingestión. La interpretación de estos resultados indica que el daño orgánico no es solo producto de la partícula per se, sino de la lixiviación de aditivos químicos (como ftalatos) que se liberan de forma acelerada por el pH del sistema digestivo.

Esta dualidad de impactos es consistente con lo documentado en la introducción respecto a la alteración de las propiedades fisicoquímicas del hábitat y su efecto en la

cadena alimenticia. Estudios como los de Shahriar et al. (42) refuerzan esta tesis al demostrar que la co-exposición con pesticidas aumenta drásticamente los niveles de glucosa sanguínea y la mortalidad en peces. Al contrastar estos datos, queda claro que la fragmentación de plásticos no solo dificulta su remoción natural, sino que multiplica su peligrosidad biológica al facilitar su ingreso en los sistemas circulatorios de la fauna.

Los resultados identifican a los organismos filtradores y a los invertebrados bentónicos como los grupos con mayor sensibilidad y capacidad de acumulación de polímeros. Especies como los bivalvos y briozoos presentan tasas críticas de retención de microesferas, mientras que en insectos como los Chironomidae, la degradación de plásticos intestinales promueve incluso la transferencia horizontal de genes de resistencia a antibióticos. La interpretación de estos hallazgos sugiere que el nicho ecológico y el mecanismo de alimentación son los principales determinantes del riesgo, situando a los filtradores en la base de una potencial biomagnificación trófica.

Esta alta vulnerabilidad de los organismos basales de la cadena trófica coincide con las advertencias de Billings et al. (3) sobre el impacto en los sistemas estuarinos y costeros. Investigaciones específicas como las de Wolinski et al. (47) confirman que la exposición prolongada en bivalvos reduce significativamente su contenido de lípidos e índice de condición, comprometiendo su supervivencia. La comparación de estos datos subraya que los efectos en taxones sensibles como los anfibios (en etapas embrionarias) y crustáceos pueden desestabilizar funciones ecosistémicas esenciales, como el ciclo de nutrientes.

La evaluación de las propiedades morfológicas determina que la forma y el tamaño de los MPs son factores críticos en la severidad del daño orgánico observado. Las microfibras y fragmentos irregulares demuestran una mayor capacidad de enredo físico y un tiempo de residencia prolongado en el tracto digestivo en comparación con las microesferas esféricas. Estos resultados indican que las partículas con alta relación superficie-volumen no solo causan mayor irritación mecánica branquial, sino que también poseen un mayor potencial de absorción de contaminantes externos.

Lo anterior ratifica lo expuesto por Zhang y Choi (10) respecto a cómo la morfología de la partícula dicta su dinámica dentro del organismo. Hallazgos experimentales de Zhou et al. (37) corroboran que las fibras plásticas inducen un estrés oxidativo significativamente superior a las esferas, elevando marcadores enzimáticos como la catalasa hepática hasta en un 67.8%. Al contrastar estas evidencias, se concluye

que el riesgo ecológico está subestimado si solo se considera la concentración de polímeros, siendo imperativo integrar la diversidad morfológica de las partículas en los protocolos de monitoreo ambiental.

4. CONCLUSIONES

En conclusión, el impacto biológico de los microplásticos en la fauna de agua dulce es integral y crónico, manifestándose a través de una degradación progresiva de la salud orgánica que trasciende la mera presencia física de los polímeros. La evidencia sistematizada revela que la exposición prolongada no solo compromete la supervivencia individual mediante la obstrucción mecánica, sino que también altera procesos metabólicos, neuroconductuales y reproductivos fundamentales, lo que sugiere un riesgo latente de desestabilización para las poblaciones acuáticas en ecosistemas continentales a largo plazo.

En cuanto a la categorización de los efectos, se determina que la toxicidad de los microplásticos opera bajo una dualidad de mecanismos: un componente físico que induce procesos inflamatorios, estrés oxidativo y lesiones tisulares en los tractos digestivos y respiratorios, y un componente químico derivado de la lixiviación de aditivos intrínsecos y la transferencia de contaminantes adsorbidos del entorno. Esta sinergia potencia el daño orgánico y la toxicidad sistémica, estableciendo a estos polímeros como vectores de riesgo químico persistente en el medio acuático.

Se identifica que los grupos taxonómicos con mayor sensibilidad son aquellos con hábitos alimenticios filtradores y organismos pertenecientes a los estratos bentónicos, debido a su mayor tasa de exposición, ingestión y acumulación tisular de partículas. La vulnerabilidad es particularmente crítica en las etapas tempranas del desarrollo ontogénico (larvas y embriones), donde la interferencia de los polímeros con el crecimiento y la aptitud biológica posiciona a estas especies como indicadores biológicos prioritarios para el monitoreo y la gestión de la salud de los ecosistemas dulceacuáticos.

Finalmente, se establece una relación directa entre las propiedades morfológicas de los microplásticos y la severidad del daño observado, siendo las microfibras y los fragmentos irregulares los que presentan el mayor potencial patogénico en comparación con las formas esféricas. Estas morfologías incrementan significativamente el tiempo de retención gastrointestinal y facilitan la irritación mecánica de las membranas celulares, lo que demuestra que la peligrosidad de la contaminación plástica está supeditada tanto a la concentración de partículas como a su heterogeneidad física y tamaño microscópico.

Aplicaciones prácticas y futuras líneas de investigación

Las aplicaciones prácticas de los hallazgos se centran en el fortalecimiento de los marcos regulatorios y la gestión técnica de la calidad del agua, permitiendo la implementación de protocolos de monitoreo ambiental basados en bioindicadores específicos, como bivalvos y macroinvertebrados bentónicos. Estos resultados facilitan el diseño de estrategias de mitigación en plantas de tratamiento de aguas residuales y el establecimiento de límites máximos permisibles de vertido para polímeros en ecosistemas continentales, optimizando así la protección de la biodiversidad y la seguridad de los servicios ecosistémicos hídricos.

En cuanto a las futuras líneas de investigación, resulta imperativo profundizar en el impacto de los nanoplásticos y su capacidad de translocación celular hacia órganos vitales, así como en los efectos transgeneracionales y epigenéticos de la exposición crónica en la fauna. Asimismo, se requiere explorar el rol de los microplásticos como vectores de microorganismos patógenos y genes de resistencia a antibióticos, fenómeno conocido como "plastisfera", integrando herramientas de transcriptómica y proteómica para desentrañar los mecanismos moleculares de toxicidad que aún permanecen inexplorados en los entornos dulceacuícolas

FINANCIACIÓN

Los autores no recibieron financiación para el desarrollo de la presente investigación.

CONFLICTO DE INTERESES

Los Autores declaran que no existe conflicto de intereses

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

En concordancia con la taxonomía establecida internacionalmente para la asignación de créditos a autores de artículos científicos (<https://credit.niso.org/>). Los autores declaran sus contribuciones en la siguiente matriz:

	Autor 1	Autor 2	
Participar activamente en:			
Conceptualización	X	X	
Análisis formal	X	X	
Adquisición de fondos	X	X	
Investigación	X	X	
Metodología	X	X	
Administración del proyecto	X	X	
Recursos	X	X	
Redacción –borrador original	X	X	
Redacción –revisión y edición	X	X	
La discusión de los resultados	X	X	
Revisión y aprobación de la versión final del trabajo.	X	X	

REFERENCIAS

1. Valentí-Muelas J, Allen S, Waugh L. Polyester Microfiber Dynamics in an Estuarine Semi-Enclosed Basin. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2025; 131(3): p. <https://doi.org/10.1029/2025JC023366>.
2. Ran H, Wu Q, Peng M, Gao S, Guo M, Zeng J, et al. Identifying the contribution of urban input to river microplastics: From the upper reach to estuary. *Journal of Hydrology*. 2025; 662(133817): p. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133817>.
3. Billings A, Jones K, Pereira M, Spurgeon D. Emerging and legacy plasticisers in coastal and estuarine environments: A review. *Science of the Total Environment*. 2024; 908(168462): p. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168462>.
4. Garcés-Ordóñez O, Castillo-Olaya V, Espinosa-Díaz L, Canals M. Seasonal variation in plastic litter pollution in mangroves from two remote tropical estuaries of the Colombian Pacific. *Marine Pollution Bulletin*. 2023; 193(115210): p. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115210>.
5. Khusanov A, Tashbaev S, Frank Y, Nizomov J, Vorobiev D, Kuranov A, et al. Evaluating Microplastic Pollution in Key Water Basins of Tashkent and Jizzakh, Uzbekistan: A Preliminary Study. *Water, Air, and Soil Pollutio*. 2026; 237(411): p. <https://doi.org/10.1007/s11270-025-09031-6>.
6. Peller J, Eberhardt L, Clark R, Nelson C, Kostelnik E, Iceman C. Tracking the distribution of microfiber pollution in a southern Lake Michigan watershed through the analysis of water, sediment and air. *Environmental Science: Processes and Impacts*. 2019; 21(9): p. <https://doi.org/10.1039/c9em00193j>.
7. Wolinski A, Ferret M, Calvès I, Tettling L, Pruski A, Lavergne E, et al. High microplastic exposure affects survival and health of *Dreissena* spp. mussels: implications for freshwater pollution monitoring. *Environmental Pollution*. 2025; 385(127123): p. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.127123>.
8. Hussain M, Blache D, Money S. Impact of Microplastics on the Physiology of Benthos. *Microplastic Pollution*. 2024;: p. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8357-5_21.
9. Saltzman J, Hlavin J, Martin C, Yeager E, Macdonald C. Behavioral Evidence of Predator–Predator Commensalism: Cobia Track and Feed on Prey Disturbed by Southern Stingrays. *Ethology*. 2026; 132(3): p. <https://doi.org/10.1111/eth.70044>.
10. Zhang J, Choi C. Improved Settling Velocity for Microplastic Fibers: A New Shape-Dependent Drag Model. *Environmental Science and Technology*. 2022; 56(2): p. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06188>.

11. de Souza J, de Pinho J, de Almeida P, de Melo A, Bergsten-Torralla L, Conte-Junior C. A Systematic Review of Microplastic Contamination in Commercially Important Bony Fish and Its Implications for Health. *Environments*. 2024; 11(8): p. <https://doi.org/10.3390/environments11080174>.
12. Namin J, Mahalleh F. Microplastic as a vector of heavy metals and chemicals in aquatic ecosystems. *Caspian Journal of Environmental Sciences*. 2025; 23(5): p. <https://doi.org/10.22124/cjes.2024.8016>.
13. Mohd A, Anuar S, Azmi A, Yusof K, Khalik W, Ibrahim Y. Microplastics as the vector for the attachment of polychlorinated biphenyls: A case study of urbanized Langat River, Malaysia. *Marine Pollution Bulletin*. 2025; 220(118382): p. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118382>.
14. Zhang Z, Wu P, Wang X, Pang Q, Wang Y, Zhang X, et al. Ecological risk assessment of marine plastic pollution. *Nature Research*. 2025; 8(10): p. <https://doi.org/10.1038/s41893-025-01620-x>.
15. Du J, Qiu L, Zhou Q, Jin M, Wu W. Microplastics as vectors for environmental contaminants in the food chain: Assessing the combined toxicological effects and bioavailability. *Toxicology Letter*. 2025; 413(111734): p. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2025.111734>.
16. Chen C, Zheng N, Zhu H, An Q, Li X, Peng L, et al. Polylactic acid microplastics and earthworms drive cadmium bioaccumulation and toxicity in the soil–radish health community. *Journal of Hazardous Materials*. 2025; 493(138391): p. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138391>.
17. Cheng Y, Chen J, Fu R, Zhang P, Chen H, Cao H, et al. Molecular mechanism differences between nanoplastics and microplastics in colon toxicity: nanoplastics induce ferroptosis-mediated immunogenic cell death, while microplastics cause cell metabolic reprogramming. *Journal of Nanobiotechnology*. 2025; 23(1): p. <https://doi.org/10.1186/s12951-025-03545-1>.
18. Chen S, Ye W, Clements K, Zan Z, Zhao W, Zou H, et al. *Bacillus licheniformis* FA6 Affects Zebrafish Lipid Metabolism through Promoting Acetyl-CoA Synthesis and Inhibiting β -Oxidation. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023; 24(1): p. <https://doi.org/10.3390/ijms24010673>.
19. Gałęcka I, Rychlik A, Całka J. Influence of selected dosages of plastic microparticles on the porcine fecal microbiome. *Scientific Reports*. 2025; 15(1): p. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80337-x>.
20. Zolotova N, Kirillova M, Dzhililova D, Tsvetkov I, Fokichev N, Makarova O. Microplastics' Impact on the Development of AOM/DSS-Induced Colitis-

Associated Colorectal Cancer in Mice. *International Journal of Molecular Sciences*. 2025; 26(23): p. <https://doi.org/10.3390/ijms262311511>.

21. Abida , Kamal M, Alqurashi A, Alhuthli S, Alharbi M, Alghamdi B, et al. Extracellular vesicles in malaria pathogenesis and Therapy: Emerging insights and future perspectives. *Microbial Pathogenesis*. 2025; 207(107902): p. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2025.107902>.
22. Salla R, Oliveira F, Jacintho J, Cirqueira F, Tsukada E, Vieira L, et al. Microplastics and TiO₂ nanoparticles mixture as an emerging threat to amphibians: A case study on bullfrog embryos. *Environmental Pollution*. 2024; 346(123624): p. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123624>.
23. Al Jabri N, Al Habsi A, BaOmer T, Barry M. Microplastics and Copper Affect Zebrafish Behavior and Responses to Predation Threat. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 2025; 89(3): p. <https://doi.org/10.1007/s00244-025-01160-7>.
24. Wang J, Sun M, Liu W, Wang F, Abakumov E, Mo M, et al. Understanding the ecological impacts of biodegradable microplastics. *Journal of Hazardous Materials*. 2025; 500(140418): p. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.140418>.
25. Scaramozzino P, Battisti S, Desiato R, Tamba M, Fedrizzi G, Ubaldi A, et al. Application of a risk-based standardized animal biomonitoring approach to contaminated sites. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2019; 191(8): p. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7653-3>.
26. Goessens T, De Baere S, De Troyer N, Deknock A, Goethals P, Lens L, et al. Multi-residue analysis of 20 mycotoxins including major metabolites and emerging mycotoxins in freshwater using UHPLC-MS/MS and application to freshwater ponds in flanders, Belgium. *Environmental Research*. 2021; 196(110366): p. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110366>.
27. Page M, McKenzie J, Bossuyt P, Boutron I, Hoffmann T, Mulrow C, et al. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*. 2021;: p. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>.
28. Martínez Rodríguez A, Kratina P, Jones JI. Different impacts of oil-based and bio-based microplastics on isotopic composition and stoichiometry of a model freshwater grazer. *Environmental Research*. 2025 March; 268: p. 120782.
29. Sebteoui K, Csabai Z, Stanković J, Baranov V, Jovanović B, Milošević D. Downsizing plastics, upsizing impact: How microplastic particle size affects

- Chironomus riparius bioturbation activity. Environmental Research. 2025 April; 270: p. 121055.
30. Michon E, Kabir AHME, Houde M, Mingelbier M, Soubaneh YD, Provencher JF, et al. Microplastic contamination in fish from the St. Lawrence River and Estuary: Roles of semisynthetic polymers, passive uptake, and wastewater inputs. Environmental Research. 2025 December; 287: p. 123170.
 31. Garcia-Garin O, Burzón M, Cardona L, Ramos R. Plastic exposure risk for coastal seabirds varies seasonally with freshwater runoff. Science of The Total Environment. 2025 May; 976: p. 179316.
 32. Kwon YS, Park CB, Lee SM, Park JW, Kim YJ, Kim JH, et al. Comprehensive analysis of proteomic and biochemical responses of Daphnia magna to short-term exposure to polystyrene microplastic particles. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2025 January; 290: p. 117581.
 33. Kong ZH, Liu T, Burdon FJ, Truchy A, Futter M, Bundschuh M, et al. Microplastics in freshwaters: Comparing effects of particle properties and an invertebrate consumer on microbial communities and ecosystem functions. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2025 January; 289: p. 117697.
 34. Li H, Song W, Wang S, Wang Y, Ma Y, Su Y, et al. Ingestion of melamine cleaning sponges-derived microplastic fibers affects the survival and reproduction of Daphnia magna. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2025 January; 290: p. 117814.
 35. Ma J, Lv C, Gong Z, Zhang K, Wang S, Li R, et al. Promotion of microplastic degradation on the conjugative transfer of antibiotic resistance genes in the gut of macrobenthic invertebrates. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2025 March; 293: p. 117999.
 36. Abbas M, Jafir M, Nazir T, Hussain S, Sarwar N, Song L, et al. A global meta-analysis reveals the toxicity of plastics on insect health. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2025 September; 302: p. 118611.
 37. Zhou Z, Zhao X, Liang L, Su M, Sun W, Shen J, et al. Comparative analysis of the toxicological and histopathological impact of microplastic fibers and microbeads in exposure associated with dibutyl phthalate in zebrafish (Danio rerio). Ecotoxicology and Environmental Safety. 2025 September; 303: p. 119053.
 38. Doria HB, Sohal N, Feldmeyer B, Pfenninger M. Size over substance: Microplastic particle size drives gene expression and fitness loss in a freshwater insect. Aquatic Toxicology. 2025 July; 284: p. 107386.

39. Horváth G, Herczeg D, Kovács B, Péntek Á, Kaczur B, Herczeg G. Microplastic uptake with food increases risk-taking of a wide-spread decomposer, the common pill bug *Armadillidium vulgare*. *Environmental Pollution*. 2025 June; 374: p. 126220.
40. Ramsperger AFRM, Wieland S, Wilde MV, Fröhlich T, Kress H, Laforsch C. Cellular internalization pathways of environmentally exposed microplastic particles: Phagocytosis or macropinocytosis? *Journal of Hazardous Materials*. 2025 June; 489: p. 137647.
41. Van Der Plas M, Nederstigt TAP, Trimbos KB, Vijver MG. Size-dependent impacts from polystyrene micro- and nanoplastics on freshwater invertebrates: A mesocosm study combining environmental DNA metabarcoding and morphological identification. *Journal of Hazardous Materials*. 2025 December; 500: p. 140304.
42. Shahriar SIM, Islam N, Emon FJ, Nepal V, Khan S, Shahjahan M. Combined impacts of organophosphate pesticide and polyamide microplastics on growth, hematology, and immune responses in juvenile striped catfish (*Pangasianodon hypophthalmus*). *Emerging Contaminants*. 2025 September; 11: p. 100520.
43. Martin C, Steenson R, Nicoll M, Galarza A, Spatharis S, Salmón P. Microplastic exposure and body condition in White-throated dipper (*Cinclus cinclus*) nestlings across anthropogenic landscapes in Scotland and the Basque Country (Spain). *Environmental Research*. 2026 March; 295: p. 123989.
44. Cheung SJ, Masud N, Robison-Smith C, Hansal P, Davies-Jones J, Ward BD, et al. Assessing the chemical interactions and biological effects of a petrochemical and bio-based plastic with a common plastic flame retardant and solvent. *Science of The Total Environment*. 2025 January; 958: p. 177958.
45. Mattson G, Allen S. Acute sublethal and lethal effects of tire wear particle leachate on larval fathead minnows (*Pimephales promelas*). *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2026 January; 309: p. 119627.
46. Teng M, Li Y, Zhao L, White JC, Sun J, Zhang Z, et al. Life cycle exposure to differentially charged polystyrene nanoplastics leads to gender-specific particle accumulation and neurotoxicity in zebrafish (*Danio rerio*). *Environment International*. 2025 April; 198: p. 109441.
47. Wolinski A, Ferret M, Bergeron B, Tettling L, Lavergne E, Pruski AM, et al. Marine and freshwater mussels as biomonitors for microplastic concentrations: A comparative laboratory study. *Aquatic Toxicology*. 2026 February; 291: p. 107659.

48. Barros J, Kumar S, Tanfous SB, Graça M, Seena S. Nanoplastics intensify metal-induced impacts in freshwater ecosystems. *Aquatic Toxicology*. 2026 February; 291: p. 107691.
49. Marelja M, Ma C, Ibelings BW, Slaveykova VI. Species-specific impacts of fibrous microplastics on behavior, survival and oxidative stress in freshwater zooplankton. *Journal of Hazardous Materials*. 2026 January; 501: p. 140718.
50. Mensah PK, Griffin NJ, Mgaba N, Akwetey MFA, Odume ON. Toxicity of Commonly Used Plasticizers to the Freshwater Organisms (Fish) and (Shrimp): Lethal and Sublethal Effects. *Environmental Toxicology*. 2026 January; 41: p. 81–94.
51. Rasta M, Lashkaryan NS, Shi X, Taleshi MS, Vayghan AH, Ahmadi A, et al. Flow-dependent modulation of microplastic toxicity in grass carp: Insights from multi-level biological endpoints and machine learning. *Journal of Hazardous Materials*. 2026 January; 502: p. 141020.
52. Turhan DO, Benli CA, Yurekli M, Güngördü A. The single and combined effects of deltamethrin and polyethylene microplastics on the development and biochemical responses of *Xenopus laevis* in early life stages. *Ecotoxicology*. 2026 March; 35: p. 37.
53. Hassan YAM, Badrey AEA, Osman AGM, Mahdy A. Distribution and Abundance of Microplastics (MPs) in the Water, Sediment, and Some Freshwater Animals, Nile River, Upper Egypt. *Water Air Soil Pollut*. 2026 January; 237: p. 34.
54. Gheorghe Ș, Pătrașcu AM, Stoica C, Balas M, Feodorov L. Ecotoxicological Effects of Polystyrene Particle Mix (20, 200, and 430 μm) on *Cyprinus carpio*. *Toxics*. 2025 March; 13: p. 246.