

ORIGINAL

Micro(nano)plastics, an emerging health problem

Micro(nano)plásticos, un problema de salud emergente

Estefanía Denise Wolfenson¹ ✉, Cristina Angelica Bustos¹ ✉

¹Universidad Abierta Interamericana, Facultad de Medicina y Ciencias de la Salud, Carrera de Medicina. Buenos Aires, Argentina.

Citar como: Wolfenson ED, Bustos CA. Micro(nano)plastics, an emerging health problem. Environmental Research and Ecotoxicity. 2025; 4:153. <https://doi.org/10.56294/ere2025153>

Enviado: 18-04-2024

Revisado: 02-09-2024

Aceptado: 11-01-2025

Publicado: 12-01-2025

Editor: Prof. Dr. William Castillo-González 

ABSTRACT

Introduction: environmental pollutants have become ubiquitous in the last two centuries; of these, plastics, and in particular microplastics (<5 mm), became the most prevalent pollutants. Microplastics are present in the air, water and food chain, and are produced as such or come from the decomposition of larger plastic materials. Despite the social advances that have enabled plastics, the mismanagement of their waste has become an urgent global problem. Pioneering studies on their toxicity have shown that exposure induces oxidative stress, inflammation and decreased cell viability in living organisms. Current research suggests that these microplastics are transported throughout the environment and can accumulate in human tissues; however, research on health effects, especially in mammals, remains very limited.

Method: an exploratory literature review was carried out, taking into account as inclusion criteria: years of publication 2018-2024, English and Spanish language, subject matter related to microplastics and their effects on the health of living beings, and in particular human health, from any geographical area, with open access and full text. The study variables were bibliometric, content and scientific quality.

Results: the presence of micro- and nanoplastics in the environment and their impact on human health is of increasing concern, as they act as vectors of hazardous substances and endocrine disruptors, can affect various body systems and trigger toxicological responses. Despite progress in understanding these effects, more research is needed to establish reference values and testing techniques. The importance of addressing this problem in a collaborative manner with governments, industry and civil society through public policies and continuous monitoring is highlighted. Comprehensive intervention is essential to address this urgent problem.

Keywords: Microplastics; Human Health; Exposure; Toxic Effects.

RESUMEN

Introducción: los contaminantes ambientales se han vuelto omnipresentes en los últimos dos siglos; de ellos, los plásticos, y en particular los microplásticos (<5 mm), se convirtieron en los contaminantes más prevalentes. Los microplásticos se encuentran presentes en el aire, el agua y la cadena alimentaria, y se producen como tales o provienen de la descomposición de materiales plásticos de mayor tamaño. A pesar de los avances sociales que han permitido los plásticos, la mala gestión de sus desechos se ha convertido en un problema mundial urgente. Estudios pioneros sobre la toxicidad de los mismos han demostrado que la exposición induce estrés oxidativo, inflamación y disminución de la viabilidad celular en organismos vivos. Las investigaciones actuales sugieren que estos microplásticos se transportan por todo el medio ambiente y pueden acumularse en los tejidos humanos; sin embargo, la investigación sobre los efectos en la salud, especialmente en los mamíferos, sigue siendo muy limitada.

Método: se llevó a cabo una revisión bibliográfica de tipo exploratoria, teniendo en cuenta como criterios de inclusión: años de publicación 2018-2024, lengua inglesa y española, temática relativa a los microplásticos y

sus efectos sobre la salud de los seres vivos, y en particular la humana, de cualquier ámbito geográfico, con acceso abierto y texto completo. Las variables de estudio fueron tanto bibliométricas, como de contenido y de calidad científica.

Resultados: la presencia de micro y nanoplasticos en el ambiente y su impacto en la salud humana es cada vez más preocupante, al actuar como vectores de sustancias peligrosas y disruptores endocrinos, pueden afectar diversos sistemas del cuerpo y desencadenar respuestas toxicológicas. A pesar del avance en la comprensión estos efectos, se necesita más investigación para establecer valores de referencia y técnicas de ensayo. Se resalta la importancia de abordar este problema de manera colaborativa con gobiernos, industria y sociedad civil mediante políticas públicas y monitoreo continuo. La intervención integral es fundamental para enfrentar esta problemática urgente.

Palabras clave: Microplasticos; Salud Humana; Exposición; Efectos Tóxicos.

INTRODUCCIÓN

Los plásticos son un material de enorme importancia en la sociedad actual con aplicaciones en todas las esferas de la vida diaria debido a su gran durabilidad y la facilidad en su producción.^(1,2,3) En los últimos años han generado una enorme preocupación tanto en las comunidades científicas como en la población debido a sus efectos nocivos sobre el medio ambiente, los seres vivos y sobre todo la salud humana.^(4,5,6)

Según una publicación de Plastics Europe del 2020, en el año 2019 se produjeron 368 millones de toneladas de plástico y se espera que esta cifra siga aumentando.^(7,8) Lamentablemente, la gestión de los residuos plásticos no es adecuada en mayoría de los países con el agravante de que la tasa de reciclaje sigue siendo muy baja.^(9,10,11,12) Esto ha provocado la acumulación de plásticos en la naturaleza.^(13,14,15,16,17) Gran parte de estos desechos provienen de fuentes terrestres como redes de pesca, cuerdas, botellas y bolsas de plástico, los cuales terminan en entornos marinos y costeros.^(18,19,20) Se estima que cada año entre 4,8 y 12,7 millones de toneladas de plástico llegan a los océanos.^(21,22)

Estos plásticos que se acumulan en el medio ambiente sufren una lenta degradación que culmina con la pérdida de la integridad del material, lo que conduce a su fragmentación en piezas más pequeñas llamadas microplásticos (MP). Esta degradación suele producirse por una combinación de procesos químicos y físicos que pueden incluir fotodegradación, oxidación, degradación hidrolítica y desintegración mecánica. En función del tipo de polímero y de su morfología, pueden diferir significativamente.⁽⁹⁾

A los microplásticos se los puede clasificar como “primarios” o “secundarios”. Se denominan primarios cuando se fabrican originalmente en tamaño pequeño para ser usados directamente o como precursores de otros productos como las fibras sintéticas, los pellets industriales y las microperlas (microbeads) agregadas a productos cosméticos. Luego, su forma quedará determinada por su origen y función, pudiendo encontrarse microplásticos primarios con distintas formas (esféricos, cilíndricos, discoidales o cúbicos). Por ejemplo, las microperlas son muy empleadas en la industria cosmética como reemplazantes de ciertos exfoliantes naturales en productos cosméticos de un solo uso, como limpiadores de maquillajes o pastas dentales. Estas microperlas son supuestamente retenidas en los filtros de las plantas de tratamiento de aguas de desecho. Sin embargo, muchas de estas plantas no están diseñadas ni tienen la capacidad de separar efectivamente estos microplásticos, por lo cual son liberados finalmente en los sistemas acuáticos. Los microplásticos secundarios se originan por la abrasión física o química (como fue mencionado en el párrafo anterior) de los elementos plásticos o fibras de mayor tamaño que llegan al medio ambiente por una mala gestión de los residuos, éstos son los más abundantes.⁽¹⁹⁾

En la Argentina los microplásticos secundarios, están representados principalmente por hilos de microfibras sintéticas o fragmentos con formas irregulares. Consisten en pequeños hilos de plástico provenientes de diversos productos fabricados con polyester, nylon, acrílico y otros textiles sintéticos, presentes en la ropa, los neumáticos, las redes de pesca, las colillas de cigarrillos y las alfombras, entre otros.⁽¹⁹⁾

Además de ser capaces de acumularse y depositarse en el medio ambiente, los microplásticos son responsables de generar una respuesta inflamatoria local, constituyendo actualmente un peligro para la salud humana. Por otro lado, cabe destacar que la toxicidad asociada a ellos depende principalmente de la dosis y de factores del polímero: tipo, tamaño de partícula, química superficial e hidrofobicidad y cuya velocidad de acumulación sobre los diversos tejidos humanos y su distribución en ellos, está directamente relacionado, con el tamaño que posean los microplásticos.⁽⁷⁾

Aunque los datos sobre los niveles de exposición a los microplásticos en entornos y organismos han aumentado rápidamente en las últimas décadas, se dispone de poca información sobre las sustancias químicas asociadas a los microplásticos.

Los nanoplasticos (NP): son aquellos que presentan un tamaño entre 1nm-100nm. Su presencia en el

medioambiente es difícil de determinar adecuadamente, debido a las dificultades técnicas para aislarlos y cuantificarlos pero aun así, son liberados al medio como resultado de la meteorización de fragmentos de plásticos más grandes, por lo que también representan una amenaza significativa para el medio ambiente y la salud humana. Presentan propiedades químicas diferentes en función de su tamaño y superficie de carga y debido a su tamaño reducido, los hace susceptibles de ser ingeridas por organismos que se encuentran en la base de la cadena alimentaria. Además, poseen una característica fundamental que produce que aumenten sus consecuencias dañinas, y es la alta relación superficie- volumen dado que otros contaminantes, como los contaminantes orgánicos persistentes (COP), podrían adsorberse a ellas y sufrir fenómenos de bioacumulación y bioamplificación. También, se debe de tener en cuenta que el contacto prolongado de este tipo de plástico a altas concentraciones genera un potencial efecto teratógeno e impactos sobre el sistema nervioso central.⁽¹³⁾

La exposición a estos micro y nanoplásticos se puede producir por ingestión, inhalación y contacto dérmico debido a la presencia de éstos en productos, alimentos y aire. En todos los sistemas biológicos, la exposición a los micro y nanoplásticos puede causar toxicidad de las partículas, con estrés oxidativo, lesiones inflamatorias y aumento de la captación o translocación. La incapacidad del sistema inmunitario para eliminar las partículas sintéticas puede provocar una inflamación crónica y aumentar el riesgo de neoplasia. Además, pueden liberar sus componentes, contaminantes adsorbidos y organismos patógenos. No obstante, los conocimientos sobre la toxicidad de los microplásticos son aún limitados.⁽¹²⁾

El objetivo de este artículo es ofrecer una visión general sobre este tema emergente, haciendo hincapié en las repercusiones de los micro y nanoplásticos en la salud humana, así como en las dificultades que plantea la detección de plásticos en un entorno biológico. En primer lugar, se examinarán las posibles fuentes de micro y nanoplásticos, su destino y sus efectos en la salud humana en especial, y a continuación se describirán las posibles vías de entrada de estas partículas en el cuerpo humano, así como sus mecanismos de absorción a nivel celular. Dado que los riesgos potenciales de los micro y nanoplásticos ambientales para el ser humano aún no se han estudiado en profundidad, se va a centrar en los estudios que demuestran las respuestas celulares inducidas por las micro y nanopartículas. En particular, se analizará la influencia del tamaño de las partículas y la química de la superficie, así como sus efectos toxicológicos, sobre la resistencia bacteriana y su acumulación en los diferentes órganos del cuerpo humano con las consecuencias patológicas que esto conlleva, con el fin de comprender los posibles riesgos de los micro y nanoplásticos para el ser humano.

Es importante tomar conciencia de que los micro y nanoplásticos son contaminantes ambientales omnipresente, que, debido al creciente consumo de plástico, unido a su naturaleza persistente, están provocando una exposición cada vez mayor e inevitable de los seres humanos.

MÉTODO

El método que se ha empleado para realizar la revisión bibliográfica es deductivo, por lo que se parten de conceptos generales para establecer hipótesis específicas o particulares. La revisión bibliográfica se inicia a partir de artículos científicos enfocados de manera genérica que hablan de palabras claves como microplástico, toxicidad o contaminación hasta centrarse en sus diversas rutas de toxicidad y vías de exposición humanas. Para ello, la búsqueda bibliográfica se llevó a cabo a partir de bases de datos como, PubMed, Scielo, y Lilacs incluyendo palabras claves, en inglés, como microplastic, toxicity and human health. Una vez obtenida la información general, se llevó a cabo un refinamiento utilizando google académico para obtener información más actualizada, por lo que, en base a la bibliografía de los primeros artículos reunidos se fue recopilando más artículos que estaban centrados en conceptos más precisos. La búsqueda se complementó mediante el uso de diversas consultas en páginas webs específicas en medicina como MedLinePlus enciclopedia médica (<https://medlineplus.gov/>) que han servido para contrastar la información obtenida en otros artículos científicos y para comprender de forma más general los posibles efectos adversos de los plásticos sobre la salud humana. La ayuda de repositorios argentinos de salud pública (<https://www.conicet.gov.ar/tag/repositorioidigital/>) y revistas internacionales de la contaminación ambiental (<https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica>) ayudó a comprender el riesgo potencial junto a los posibles efectos adversos e impactos que ocasionan los microplásticos sobre la salud humana y sobre el ecosistema terrestre, incluso en nuestro país.

Para este propósito, se establecieron los siguientes criterios de inclusión: Año de publicación (entre 2017 y 2024), idioma (inglés y español), acceso (acceso abierto), tipo de publicación (artículo, artículo de revisión y capítulos de libros) y estado de publicación (final).

RESULTADOS

Hoy en día, los microplásticos son contaminantes muy extendidos en el medio ambiente que contienen sustancias químicas peligrosas como parte del material, pero que también pueden adsorber, magnificar y diseminar contaminantes ambientales.

A pesar de que el destino y los efectos de los micro y nanoplásticos en el cuerpo humano siguen siendo controvertidos, el impacto en la salud humana es preocupante, pues estudios recientes sugieren que estas

partículas plásticas pueden actuar como vectores de disruptores endocrinos pudiendo interferir tanto el sistema nervioso, como respiratorio, circulatorio, gastrointestinal, hormonal y reproductor, afectando fuertemente la calidad de vida de las personas. Debido a que estos plásticos pueden infiltrarse en los tejidos humanos y desencadenar una serie de respuestas toxicológicas, como inflamación, estrés oxidativo y alteraciones del metabolismo lipídico, efectos que pueden deberse potencialmente a sus propiedades físicas (tamaño, forma y longitud), químicas (presencia de aditivos y tipo de polímero), concentración o crecimiento de biopelículas microbianas.

En general, las investigaciones sobre microplásticos han ganado atención en los últimos cinco años. Los estudios generados han documentado la cantidad de microplásticos en aguas superficiales, sedimentos y ecosistemas, y también en las consecuencias de su ingesta, acumulación y potencial tóxico en modelos animales y en poblaciones humanas. Además, existen evidencias de microplásticos en el agua potable y en otros productos de consumo.

Aunque se han logrado avances significativos en la comprensión de los mecanismos celulares y moleculares implicados en el perjuicio a la salud que generan los micro y nanoplásticos, aún es necesaria una amplia investigación. Queda mucho camino que recorrer hasta que se tengan valores de referencia para cada tipo de plástico, así como técnicas de ensayo normalizadas de uso universal que puedan ser contrastadas mediante ejercicios de intercomparación.

De esta manera se logra entender que los micro y nanoplásticos son una problemática, que se fortalece con el paso del tiempo y aún permanece invisible en algunos campos, pero que requiere una intervención inmediata y profunda. Se destaca que abordar este problema requiere un enfoque integral y colaborativo que involucre a diversos actores, incluyendo a los gobiernos (a través de políticas públicas y legislaciones estatales para favorecer el monitoreo continuo de estas micropartículas ambientales), la industria, la sociedad civil y los consumidores.

DISCUSIÓN

Los plásticos son un material de enorme importancia en la sociedad actual con aplicaciones en todas las esferas de la vida diaria debido a su gran durabilidad y la facilidad en su producción. En los últimos años han generado una enorme preocupación tanto en las comunidades científicas como en la población debido a sus efectos nocivos sobre el medio ambiente, los seres vivos y sobre todo la salud humana.

Un análisis mundial reveló que los residuos plásticos acumulados en vertederos o en el medio natural ascendieron a aproximadamente 4900 millones de toneladas métricas entre 1950 y 2015, y que esta cifra ascenderá hasta aproximadamente 12 000 millones de toneladas en 2050, lo que inevitablemente conducirá a una contaminación generalizada por plásticos.⁽²⁾

Además la pandemia por el COVID-19 agravó la situación, dado que el uso masivo de mascarillas fabricadas por polímeros plásticos (polipropileno) ha significado la generación mundial de todavía más residuos plásticos, que por las deficientes estrategias de control en cuanto a su disposición final, terminaron acumulados en el medio ambiente.⁽¹¹⁾

Estos plásticos que se acumulan en el medio ambiente sufren una lenta degradación que culmina con la pérdida de la integridad del material, lo que conduce a su fragmentación en piezas más pequeñas llamadas microplásticos, que también pueden ser fabricados como tales. Recientemente, en el año 2020, ISO ha definido como microplástico a “cualquier partícula sólida insoluble en agua con cualquier dimensión entre 1 y 1000 μm ” (ISO/TR 21960:2020 Plastics - Environmental aspects - State of knowledge and methodologies), mientras que la Directiva 2019/904 reconoce la contaminación terrestre y del suelo introduciendo a los microplásticos como sustancias emergentes y prioritarias en el análisis de las aguas.⁽⁹⁾

La degradación de los plásticos se produce por una combinación de procesos químicos y físicos que pueden incluir fotodegradación, oxidación, degradación hidrolítica y desintegración mecánica. En función del tipo de polímero y de su morfología, pueden diferir significativamente. La fotodegradación causada por la radiación ultravioleta (UV) de la luz solar es capaz de romper los enlaces químicos de los polímeros sintéticos. El proceso afecta no sólo a los propios polímeros, sino también a los aditivos incorporados a los materiales, lo que provoca cambios en su estructura química y en sus propiedades físicas. El oxígeno puede aumentar la absorción de la radiación UV mediante la formación de un complejo con hidrocarburos insaturados conjugados, acelerando así el proceso de degradación. Además, polímeros como los poliésteres o las poliamidas también pueden degradarse por hidrólisis, es decir, la escisión de enlaces éster o amida por reacción con el agua. Y las fuerzas mecánicas externas también contribuyen a la fragmentación en trozos más pequeños, cuyas dimensiones disminuyen gradualmente con el tiempo. Los trozos de plástico degradado forman un conjunto muy heterogéneo, que varía en tamaño, forma, densidad, así como en la composición química del material específico.⁽⁹⁾

La contaminación por microplásticos (MPs) comenzó como un problema de contaminación marina, pero en la actualidad se ha convertido en un problema de salud pública.^(23,24,25) Hoy en día, diversos estudios revelan que los MPs están distribuidos en todos los continentes y océanos del planeta. Debido a que los MPs continuamente

se están fragmentando y distribuyendo en el planeta, se han logrado reportar partículas de MPs en el aire, suelo, sedimentos, aguas interiores y exteriores,⁽²⁶⁾ arena de playa,⁽²⁷⁾ sistemas marinos, columnas de agua, sedimentos de aguas profunda,⁽²⁸⁾ mar profundo, incluso llegando a zonas remotas como las regiones polares,^(29,30) y glaciares.⁽³¹⁾ De hecho, un estudio afirma que, sin importar el lugar y la fecha de muestreo, si se toma una muestra siempre se encontrara con microplásticos e incluso pellets de plásticos.

Según su origen los microplásticos se pueden clasificar en primarios y secundarios. Los microplásticos primarios, son creados específicamente para aplicaciones particulares, como las microperlas o los pellets. Estos se utilizan en una variedad de productos, como productos de limpieza, cosméticos, pinturas, exfoliantes, pasta dentífrica, entre otros. La fabricación y uso de estos MPs contribuyen significativamente al aumento de la contaminación por plásticos en el medio ambiente. En muchos casos, los MPs primarios son preferidos por su versatilidad y bajo costo, ya que pueden reemplazar ingredientes naturales más costosos. Asimismo, se emplean partículas de MPs de acrílico, melanina y poliéster en herramientas de limpieza de maquinarias y barcos. Además, los MPs primarios se emplean en la producción de macroplásticos, como los pellets, que se utilizan en procesos de moldeo y extrusión para dar forma a diferentes productos plásticos. Algunos MPs primarios y sus aditivos, como los ftalatos, se utilizan en diversas aplicaciones médicas, incluidos algunos medicamentos. Por ejemplo, el medicamento Asacol, utilizado en el tratamiento de la colitis ulcerosa leve a moderada, contiene ftalato de monobutilo y ftalato de dimetilo en ciertas concentraciones que le confieren propiedades beneficiosas, como resistencia a la digestión gástrica y control de la velocidad de absorción del principio activo. Otros medicamentos, como Videx EC y Creon, también contienen compuestos ftálicos en su composición para diversas funciones, como excipientes o saborizantes artificiales.⁽²³⁾

Los microplásticos secundarios se generan a través de la fragmentación y degradación selectiva de macroplásticos expuestos a factores externos, lo que puede ocurrir durante su transporte a diferentes ecosistemas. Este grupo incluye también a las fibras sintéticas provenientes de textiles. La fragmentación de los macroplásticos puede ocurrir por diversos procesos, como la fotodegradación, donde la luz solar oxida la estructura química de los polímeros, causando rupturas en los enlaces y reduciendo la masa molecular, lo que los vuelve frágiles y propensos a la fragmentación en pequeños trozos. Asimismo, la degradación biológica también puede contribuir a la fragmentación de plásticos, ya que algunos son susceptibles a la biodegradación por bacterias y hongos. En ambientes como los marinos, los macroplásticos también pueden experimentar degradación mecánica debido a la acción combinada del viento, las olas y la abrasión de partículas plásticas en sedimentos y arena. Por otro lado, las fibras de origen animal, vegetal y sintético presentes en la ropa pueden desprenderse durante el lavado, transportándose desde las lavadoras hacia las aguas residuales. Incluso la simple manipulación de envases plásticos puede generar microplásticos por abrasión, liberándolos al medio ambiente.

Otras fuentes destacables de microplásticos secundarios incluyen el desgaste de neumáticos, considerado una fuente sigilosa de contaminación por microplásticos. Este desgaste está influenciado por factores como el tipo de pavimento, temperatura, velocidad, edad y composición de los neumáticos. Además, los microplásticos secundarios pueden originarse en plantas de tratamiento de aguas residuales, vertederos, áreas industriales y rellenos sanitarios, debido a la incineración de residuos plásticos.⁽²³⁾

En el medio marino los microplásticos primarios normalmente entran a través de las aguas residuales, mientras que los secundarios son introducidos a través de fuentes adicionales, siendo una de las más importantes la degradación de basuras de plásticos en las playas, encontrando en ellas altas concentraciones de elementos peligrosos y, en particular, los metales tóxicos Cd y Pb. Los microplásticos pueden encontrarse principalmente en el compartimento marino y el atmosférico. Son comunes en todos los océanos del mundo y se pueden encontrar ubicuamente en el aire, en las aguas, en la biota, así como en sedimentos.⁽³⁾

Los microplásticos pueden contener dos tipos de sustancias químicas: (i) aditivos y materias primas poliméricas (por ejemplo, monómeros u oligómeros) procedentes de los plásticos, y (ii) sustancias químicas absorbidas del ambiente circundante.⁽⁹⁾

Los aditivos son sustancias químicas que se añaden intencionadamente durante la producción de plásticos para conferirles cualidades como el color y la transparencia, y para aumentar el rendimiento de los productos plásticos y mejorar tanto la resistencia a la degradación por ozono, temperatura, radiación luminosa, moho, bacterias y humedad, y la resistencia mecánica, térmica y eléctrica. Incluyen cargas inertes o de refuerzo, plastificantes, antioxidantes, estabilizadores UV, lubricantes, tintes y retardantes de llama.

Entre las cargas inertes se utilizan, polvo de madera y roca, arcilla, caolín, grafito, fibras de vidrio, copos de algodón, yute o lino, pasta de celulosa, etc. Según las definiciones propuestas por la American Society for Testing and Materials (ASTM-D-883), las cargas inertes son materiales que se utilizan para modificar la resistencia, las propiedades de trabajo y flujo, y la contracción de los plásticos, mientras que los de refuerzo, también llamados cargas, se definen como aquellos con propiedades de resistencia significativamente superiores a las de la resina base.⁽⁵⁾ Estos rellenos (como el negro de humo en el caucho), que se mezclan con el polímero, dan lugar a un volumen de interfaz que se genera en la superficie de contacto entre el relleno y la resina. Son

las propiedades superiores de esta capa de interfaz las que consiguen aumentar el módulo y las propiedades mecánicas como la resistencia al impacto o resistencia a la tracción en el polímero compuesto. Como el efecto está relacionado con la superficie, los tamaños de partícula más pequeños de las partículas de relleno suelen producir un mejor efecto de refuerzo. Existen de diferentes tipos: arcillas, sílice, vidrio, tiza, talco, amianto, alúmina, rutilo, negro de humo y nanotubos de carbono.⁽⁹⁾

Porque los plásticos son particularmente sensibles a la acción degradante de la luz, la radiación UV y el calor, los estabilizantes, tienen la función de impedir la descomposición térmica durante el procesado, así como la oxidación y la consiguiente rotura de las cadenas poliméricas (utilizando fenoles y aminas aromáticas). Consisten principalmente en sales orgánicas o inorgánicas de cadmio, bario o plomo. Los colorantes solubles o insolubles son sustancias orgánicas o inorgánicas en forma de polvos finos que dan al polímero el color deseado. Los colorantes solubles mantienen la transparencia del plástico, mientras que los insolubles (pigmentos) cubren el plástico. Insolubles (pigmentos) lo cubren para hacerlo opaco. Muchos pigmentos inorgánicos contienen metales pesados, mientras que los pigmentos orgánicos incluyen varias familias cromóforas como los pigmentos azoicos, ftalocianina antraquinonas y otros cromóforos.

Los lubricantes y los antiadherentes son sustancias que facilitan la transformación de los materiales plásticos, mejoran sus características de fluidez. Consisten en estearatos de calcio o magnesio.⁽¹⁰⁾

Los retardadores de llama tienen la función de enfriar o proteger un material en caso de incendio evitando la oxidación de los gases inflamables o formando una capa de ceniza. Son productos que contienen, por ejemplo, cloro y bromo, que se liberan por la acción de la llama; fósforo, que favorece la transformación en carbón; e hidróxido de aluminio, que genera vapor de agua y CO₂ a 200 C. Los aditivos, en casi todos los casos, no están unidos químicamente al polímero plástico; sólo algunos retardadores de llama se polimerizan con las moléculas de plástico, pasando a formar parte de la cadena polimérica.

Aunque estos aditivos mejoran las propiedades de los productos poliméricos, muchos de ellos son tóxicos, y su potencial de contaminación del suelo, el aire y el agua es elevado. Los estudios sobre su impacto en los organismos acuáticos con los que entran en contacto a través de la ingestión de macro y microplásticos todavía está en curso.⁽⁶⁾

Los nanoplásticos: son aquellos que presentan un tamaño entre 1nm-100nm. Su presencia en el medioambiente es difícil de determinar adecuadamente, debido a las dificultades técnicas para aislarlos y cuantificarlos pero aun así, son liberados al medio como resultado de la meteorización de fragmentos de plásticos más grandes, por lo que también representan una amenaza significativa para el medio ambiente y la salud humana. Presentan propiedades químicas diferentes en función de su tamaño y superficie de carga y debido a su tamaño reducido, los hace susceptibles de ser ingeridas por organismos que se encuentran en la base de la cadena alimentaria. Además, poseen una característica fundamental que produce que aumenten sus consecuencias dañinas, y es la alta relación superficie-volumen de las nanopartículas dado que otros contaminantes, como los contaminantes orgánicos persistentes (COP), podrían adsorberse a ellas y sufrir fenómenos de bioacumulación y bioamplificación. También, se debe de tener en cuenta que el contacto prolongado de este tipo de plástico a altas concentraciones genera un potencial efecto teratógeno e impactos sobre el sistema nervioso central.⁽¹³⁾

La exposición a estos micro y nanoplásticos se puede producirse por ingestión, inhalación y contacto dérmico debido a la presencia de éstos en productos, alimentos y aire.

Estrategias de detección

La creciente preocupación sobre la contaminación por MP y NP en el medio ambiente ha generado una demanda de técnicas de análisis precisas y sensibles para su identificación. Para abordar este desafío, se han utilizado una variedad de técnicas fisicoquímicas de análisis para detectar y cuantificar la presencia de plásticos en diferentes matrices ambientales. A continuación, se describen las técnicas de análisis que ofrecen mejor información sobre la presencia de MP y NP en el medio ambiente.

Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR): la FTIR es una técnica analítica utilizada en la identificación de materiales poliméricos basada en la absorción de la radiación infrarroja por las moléculas. El análisis de FTIR se emplea para identificar las características espectrales únicas de los polímeros plásticos, para determinar la composición química de fragmentos plásticos desconocidos y, asimismo, para evaluar el grado de envejecimiento de las muestras recogidas del medio ambiente. Además, permite la identificación de diferentes tipos de plásticos y la determinación de su abundancia en muestras ambientales.

Espectrometría de masas con plasma inductivamente acoplado (ICP-MS): la ICP-MS, por sus siglas en inglés, es una técnica empleada para la determinación cuantitativa de elementos presentes en una muestra a niveles de trazas. La ICP-MS puede ser acoplada con técnicas de separación para identificar y cuantificar la presencia de aditivos y contaminantes asociados con los MP y NP. Lo anterior proporciona información crucial sobre los posibles efectos tóxicos de los MP y NP en los organismos vivos y en los ecosistemas.

Microscopía electrónica de barrido (MEB): Este método es una herramienta analítica utilizada para identificar diminutos fragmentos de plásticos y proporciona información detallada sobre la morfología, tamaño

y composición química elemental de los mismos., lo cual puede facilitar características adicionales sobre su origen y proceso de degradación.

Microscopía electrónica de transmisión (MET): es otra herramienta importante en la identificación y caracterización de MP y NP; esta permite la observación de la muestra a nivel molecular y atómico, proporcionando imágenes con una resolución extremadamente alta, permitiendo la observación del tamaño y la forma de las partículas de MP y NP, lo cual es esencial para distinguir entre diferentes tipos de materiales, su tamaño y la forma nanométrica de las partículas plásticas para ser relacionadas con su origen.⁽¹⁵⁾

Efectos de los micro y nanoplásticos en diferentes órganos y sistemas del cuerpo humano

Aparato gastrointestinal y urinario

Los microplásticos, con frecuencia, ingresan al esófago, estómago e intestinos a través de la boca, por lo tanto, sus efectos tóxicos se evidencia en todo el tracto digestivo, éstos efectos tóxicos se manifiestan como trastornos de la flora intestinal, reducción de la secreción de moco, destrucción de la proporción de probióticos y bacterias patógenas; todo esto lleva al daño en el epitelio de la mucosa intestinal y, en última instancia, conduce a la destrucción de la barrera intestinal; lo que conlleva a trastornos del metabolismo de los aminoácidos y ácidos grasos y a la deficiencia en la absorción de nutrientes e incluso a la toxicidad hepática.⁽¹⁵⁾

En un estudio realizado por el Laboratorio Clave de Seguridad en Salud Pública del Ministerio de Educación, Escuela de Salud Pública, Instituto de Nutrición, Universidad de Fudan, Shanghai, China, en niños de edad preescolar se llegó a la conclusión de que los niños que pasaron más tiempo comiendo una comida en recipientes de plástico tenían niveles más altos de PVC en las heces, además los productos lácteos, en particular la leche de fórmula, pueden influir en la exposición de los niños a los microplásticos. Cada vez hay más pruebas de que el uso de biberones puede provocar una mayor liberación de micropartículas durante la preparación, los participantes que utilizaban biberones de silicona contenían concentraciones más elevadas de MP totales en las heces que los que utilizaban biberones de PPSU. Por lo tanto, se cree que el uso extensivo de biberones puede ser una fuente particular de contaminación de la leche de fórmula, lo que aumenta indirectamente la ingestión imperceptible de micropartículas. Además de vio que los microplásticos en el aire pueden ser inhaladas, y pueden depositarse contaminando utensilios, alimentos y agua, para luego ser ingeridos. Y los niños parecían excretar más MP si sus padres fumaban. Fumar también produce partículas finas de MPs. Cuando los padres fuman en presencia de los niños, estas partículas suspendidas en el aire tienden a ser inhaladas por ellos, lo que afecta al sistema respiratorio, y las partículas finas pueden entrar en el sistema circulatorio. Estos resultados sugieren que una elevada exposición a determinados MP puede estar asociada a una mayor incidencia de enfermedades relacionadas con el intestino en niños.⁽¹⁷⁾

En el sistema urinario, los NP que logran cruzar las barreras epiteliales pueden potencialmente filtrarse a través de los riñones y aparecer en la orina, ocasionando inflamación y disfunción renal.^(15,32,33)

Sistema Endócrino

Los microplásticos (MP) contienen y lixivian muchas sustancias químicas peligrosas, incluyendo las que alteran los sistemas hormonales del organismo o Perturbadores Endocrinos (PE). Un ejemplo muy conocido es el del bisfenol A (BPA), utilizado en los plásticos de policarbonato. Además, una amplia gama de otros aditivos plásticos, incluidos los ftalatos, los retardantes de llama y los metales pesados son conocidos como PE.

Los PE en los plásticos, los bisfenoles y los ftalatos son los más estudiados por imitar o interferir en los procesos regulados por los estrógenos y andrógenos, como lo es la reproducción. Estas hormonas están estrictamente reguladas; si se interrumpen por los PE, pueden producirse disfunciones reproductivas, como la reducción de la fertilidad, el aborto y la infertilidad.

Se ha demostrado los efectos directos de los PE en el número y la calidad de los espermatozoides, en las anomalías cromosómicas de los óvulos y en los procesos biológicos que intervienen en la producción de espermatozoides y óvulos.

La exposición al BPA también se asocia con el síndrome de ovario poliquístico (SOP) en las mujeres, y en los hombres, el BPA disminuye la calidad y la motilidad del esperma, causa estrés oxidativo y altera la esteroidogénesis. Además el BPA está asociado con la disfunción sexual entre los hombres expuestos a altos niveles ocupacionales. Estudios realizados en seres humanos demostraron relaciones entre la exposición prenatal al BPA y el aumento de la grasa corporal o las curvas de crecimiento postnatal en los niños, resultados que son relevantes para la obesidad en la primera infancia.

La exposición al BPA también se asoció con la alteración de la función de las células B del páncreas y el aumento de la resistencia a la insulina en los adultos, lo que concuerda con los efectos sobre la salud observados en la diabetes tipo 2; y con niveles anormales de enzimas hepáticas, consistentes en la alteración de la función hepática y la enfermedad de hígado graso no alcohólico.

Las sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS) también se asociaron con la alteración del período puberal en los niños, medido por la edad de la menarca en las mujeres y las concentraciones séricas

de testosterona en los hombres. También hay algunas pruebas de que la exposición a las PFAS se asocia con un mayor riesgo de cáncer de mama, aunque esta asociación puede ser más fuerte en los cánceres que dependen de los receptores de estrógeno.

Los retardantes de llama bromados (BFR por sus siglas en inglés) alteran los niveles de la hormona tiroidea. Es especialmente preocupante si la exposición ocurre durante la gestación y los primeros años de vida, ya que la hormona tiroidea es esencial para el neurodesarrollo. Los estudios epidemiológicos han demostrado una asociación entre la exposición a los BFR en el desarrollo y los subsiguientes déficits en los niños, incluyendo el índice de desarrollo psicomotor, el comportamiento relacionado con la atención y el rendimiento del coeficiente intelectual. También hay evidencia que sugiere que los BFR pueden interferir con hormonas importantes para la respuesta del cuerpo al estrés.

Los ftalatos pueden metabolizarse ampliamente al ser absorbidos por el cuerpo, creando metabolitos potencialmente tóxicos. Los niveles de metabolitos de ftalatos son más altos en los humanos expuestos a través de su ocupación o de terapias médicas que requieren el uso de vías intravenosas, bolsas de sangre y medicamentos orales que contienen revestimientos de ftalatos. La exposición a ftalatos durante el desarrollo fetal se ha asociado con una reducción del número y la calidad de los espermatozoides y un aumento del riesgo de disgenesia gonadal. Además la exposición a los ftalatos también se asoció con un mayor riesgo de resistencia a la insulina y otros factores de riesgo cardiometabólico.

Los metales tóxicos como el cadmio y plomo en los microplásticos se asocian con niveles hormonales y desarrollo reproductivo anormales; con subfertilidad/infertilidad en los seres humanos y con un mayor riesgo de cáncer de mama y próstata, ambos dependientes de las hormonas. Las concentraciones de plomo en la circulación están asociadas con el retraso del inicio de la pubertad en las niñas e incluso en los niños en algunos estudios; así como con un inicio más temprano de la menopausia, lo que sugiere que la exposición al plomo puede acortar la vida reproductiva de la mujer. Las concentraciones de plomo y cadmio en la sangre se asocian con un mayor tiempo de embarazo en las parejas que intentan activamente concebir.⁽²⁶⁾

Aparato respiratorio

La mayoría de los microplásticos encontrados en la atmósfera han sido en forma de fibras. Éstos tienden a causar una toxicidad mayor que los fragmentos o esferas. Las partículas con morfología de fibra y de mayor longitud son las que mayor capacidad presentan para evitar el aclaramiento mucociliar y las que han demostrado tener una mayor durabilidad en fluidos fisiológicos; la forma delgada y alargada también dificulta la fagocitosis y eliminación por los macrófagos alveolares, lo que les permite acumularse y persistir más fácilmente al ser inhaladas, en comparación con partículas de otras formas y tamaños.⁽²⁷⁾

La inhalación de estas fibras de microplásticos también representa un riesgo para la salud humana porque reducen la absorción de nutrientes, provocan un cambio hormonal, estrés oxidativo, fibrosis pulmonar, disfunción inmunitaria, alteración del metabolismo bioquímico y energético, alteración de la proliferación celular y desarrollo anormal de órganos. Los estudios sugieren que los nanoplasticos provenientes de la fibra de vidrio pueden penetrar más profundamente en los pulmones y la piel ocasionando un daño más profundo.⁽¹⁵⁾

Sangre y sistema inmunitario

Los microplásticos pueden ingresar al flujo sanguíneo a través del tracto gastrointestinal o respiratorio, dado que aquellos de menos de 10 μm podrían atravesar las membranas celulares y trasladarse fácilmente al sistema circulatorio y alterar la función del sistema inmunitario. La evidencia científica ha demostrado que la exposición a estos materiales resulta en un aumento del daño en el ADN en células polimorfonucleares y monocitos de los seres humanos (causando inestabilidad genómica en linfocitos) desencadenando respuestas inflamatorias crónicas y afectando la capacidad del cuerpo para combatir infecciones. Además, la exposición crónica pueda terminar ocasionando enfermedades, como el cáncer, dados los daños causados al material genético de las células.^(15,24)

Cerebro y sistema nervioso

Estudios preliminares sugieren que los micro y nanoplasticos pueden atravesar la barrera hematoencefálica, lo cual podría llevar a neuroinflamación, estrés oxidativo y daño neuronal, porque pueden producir especies reactivas del oxígeno altamente oxidantes pudiendo ocasionar inflamación, muerte celular y la inhibición de la actividad de la acetilcolinesterasa (Ache); dando como resultado una acumulación excesiva de acetilcolina, lo que conlleva a que los nervios colinérgicos se sobreexciten y provoquen trastornos neurológicos (comportamientos anormales y depresión). Aunque la investigación está en una etapa inicial, se especula que la exposición prolongada podría contribuir a trastornos neurológicos y cognitivos.^(4,15) Según un estudio realizado en un modelo animal en el Instituto de Neurociencias George and Anne Ryan, de la Universidad de Rhode Island, EEUU (2023) se llegó a la conclusión de que la exposición a corto plazo a microplásticos induce tanto modificaciones de comportamiento como alteraciones en los marcadores inmunológicos en los tejidos del hígado y el cerebro.

Además, observaron que estos cambios difieren según la edad, lo que indica un posible efecto dependiente de ella. Estos hallazgos aconsejan la necesidad de realizar más investigaciones para comprender mejor los mecanismos por los cuales los microplásticos pueden inducir cambios fisiológicos y cognitivos.^(4,15,18)

Embriones y barrera placentaria

Se ha demostrado que los microplásticos pueden cruzar las barreras placentarias lo que plantea preocupaciones sobre la exposición prenatal. Esta exposición podría afectar el desarrollo embrionario ocasionando alteración de la expresión génica y contribuyendo a malformaciones o alteraciones en el desarrollo neurológico y del sistema inmunitario del feto. Algunos estudios han demostrado que los más frecuentes son el policloruro de vinilo (PVC), el polipropileno (PP) y el tereftalato de polietileno (PET). La presencia de estos componentes dentro la placenta podría afectar la salud materna y fetal, dado que estos pueden contener aditivos químicos y contaminantes que podrían ser liberados en el entorno placentario y tener efectos tóxicos. Además^(15,25), cuando la exposición ocurre en una mujer embarazada, su feto en desarrollo está expuesto, así como también las células germinales dentro del feto, que se convierten en la tercera generación afectada. De manera que tres generaciones están expuestas simultáneamente. Se ha demostrado que los PE causan varios tipos de modificaciones epigenéticas en las células germinales, producidas a partir del esperma o de los óvulos, que en la descendencia (los hijos) dan lugar a una mayor propensión a trastornos endocrinos y neurológicos en la siguiente generación (los nietos). Por lo tanto, la exposición a los PE antes de la concepción o temprana en la vida, influye en múltiples generaciones.^(26,32)

Sistema cardiovascular

La autofagia es un proceso celular altamente conservado que desempeña un papel fundamental en el mantenimiento de la homeostasis celular mediante el reciclaje de organelas y proteínas dañados. Este proceso es especialmente importante en el corazón, donde contribuye a mantener la función normal de los miocitos (células del músculo cardíaco) y a responder a diversos factores de estrés, como la isquemia o la sobrecarga de presión. La alteración de la autofagia por los micro y nanoplasticos (MNP) podría conducir a la acumulación de organelas y proteínas dañados en los miocitos, perjudicando su función y contribuyendo potencialmente al desarrollo o progresión de la enfermedad cardiovascular (ECV). Además, investigaciones recientes han explorado el impacto de los microplásticos (MPs) en el sistema vascular.

El desencadenamiento o aceleración de la autofagia puede deberse a una respuesta cardiotóxica de los MPs. Estudios sugieren que la cardiotoxicidad de los MNP puede causar disfunción cardíaca a través de mecanismos como el estrés oxidativo, la disfunción mitocondrial y la inflamación. Aunque se cree que las partículas de plástico más pequeñas que los MPs, como los nanoplasticos (NPs), desempeñan un papel importante en la toxicidad del cuerpo humano., los estudios centrados en su toxicidad cardiovascular no han demostrado que los NPs sean capaces de causar una disfunción cardíaca, ya que los estudios centrados en sus efectos tóxicos cardiovasculares son escasos.

Recientemente, un estudio informó de que la exposición a NPs de poliestireno con diversos grupos funcionales exacerba significativamente las condiciones similares a la diabetes mellitus tipo 2 (DMT2) principalmente a través de la inhibición de la vía de señalización P-AKT/P-FoxO1. Este estudio subraya el potencial de la contaminación por NPs para contribuir al desarrollo y la progresión de los trastornos cardiometabólicos.

Las respuestas inflamatorias y el metabolismo de los lípidos desempeñan un papel importante en la aparición y el desarrollo de las ECV. Estudios recientes han indicado el impacto de los MNP en el sistema inmunitario sistémico, con especial atención a los efectos en el sistema cardiovascular.^(4,15)

Además, se descubrió que los NPs aumentan la liberación de citocinas proinflamatorias en monocitos humanos y células dendríticas derivadas de monocitos. Por otra parte, los NPs de poliestireno también pueden contribuir al desarrollo de la aterosclerosis al afectar al estrés oxidativo mediado por las mitocondrias, promover la diferenciación de las células espumosas y alterar el metabolismo de los lípidos.⁽²⁸⁾

Los mecanismos implicados son sorprendentemente similares a los observados con los NPs. La lipoproteína de baja densidad oxidada (OxLDL), con un diámetro aproximado de 20-30 nm, desempeña un papel crucial en la aparición y progresión de la aterosclerosis. No sólo favorece la formación de células espumosas, sino que también desencadena la inflamación y afecta a la función de las células endoteliales.⁽²⁸⁾

Además, otro estudio sugirió que los NPs de poliestireno de 50 nm y la acilcarnitina de cadena larga (LCAC) por sí solas exacerban la acumulación de lípidos mediante la regulación al alza de los receptores de macrófagos (MARCO) en las células espumosas activadas por Ox-LDL, promoviendo así el desarrollo de la aterosclerosis. Estos hallazgos aportan nuevos conocimientos sobre los mecanismos que vinculan los MNP y la aterosclerosis.⁽²⁸⁾ Estos resultados demuestran que los MNP pueden provocar reacciones inflamatorias, que conducen a la disfunción endotelial vascular mediante la activación de células inflamatorias, la inducción de inestabilidad genómica y la liberación de mediadores inflamatorios, como citoquinas y sustancias de estrés oxidativo. También pueden afectar al metabolismo de los lípidos y favorecer el desarrollo de la aterosclerosis.⁽²⁸⁾

Dado que los estudios han informado de que los MNP, especialmente los MP, se encuentran en los coágulos sanguíneos humanos y pueden acumularse en las arterias, los científicos creen que el riesgo de exposición a los MP está seriamente subestimado. En cuanto al sistema de coagulación, el estudio también reveló una correlación positiva significativa entre el número de partículas en el trombo y el recuento de plaquetas tras ajustar los posibles factores de error. Además, un estudio informó que la interacción entre los MNP, la trombosis y el sistema cardiovascular depende en gran medida de su tamaño y de la química de su superficie, lo que sugiere que el efecto de las MP está estrechamente relacionado con su tamaño y la química de su superficie. Y las partículas cargadas en superficie (como los MNP aminados) pueden favorecer la agregación plaquetaria y la trombosis al interactuar con los receptores de la superficie de las plaquetas.⁽²⁸⁾

Resistencia Antibiótica

Los compuestos antimicrobianos como los antibióticos, los biocidas y los metales pesados pueden impulsar el desarrollo de resistencia a los antibióticos y estimular la transferencia horizontal de genes de resistencia a los antibióticos en los microorganismos.

Los microplásticos proporcionan una superficie hidrófoba que favorece la formación de biopelículas microbianas, en las que las condiciones ambientales son las principales impulsoras de la formación de estas biopelículas. Bacterias patógenas como *Aeromonas* spp. y *Vibrio* spp. y patógenos humanos oportunistas como *E. coli* pueden estar invariablemente presentes en estos biofilms. Los microplásticos pueden adherir selectivamente tanto antibióticos como bacterias resistentes a los antibióticos en sus superficies en lixiviados de vertederos, agua dulce, así como en agua de mar.⁽³¹⁾

Estrategias de mitigación

La contaminación por plásticos se puede prevenir aplicando jerarquías de residuos dentro de la economía de los plásticos para aumentar de manera drástica la reducción, reutilización y reciclaje de residuos plásticos.⁽¹⁹⁾

Dado que el origen de todos los microplásticos secundarios son siempre macroplásticos que se fragmentan en los distintos ecosistemas, la mayoría de las tecnologías aplicadas para su mitigación se encuentran focalizadas ya sea a prevenir su entrada al medioambiente o a la remoción de los mismos in situ.⁽¹⁹⁾

Es importante establecer alternativas y estrategias que contribuyan a solucionar esta importante problemática, algunas de las cuales puede girar alrededor de:

- Reducción en la producción y consumo de plásticos: una de las estrategias más efectivas es reducir la producción y el consumo de plásticos en general. A través de la promoción de la utilización de materiales alternativos más sostenibles y biodegradables (Por ejemplo, los plásticos de invernadero se pueden sustituir por materiales biodegradables, como la madera o el bambú), fomentando la reutilización de productos de plástico y adoptando prácticas de consumo responsable, siendo una de las medidas que se han enmarcado en algunos países.^(4,13)
- Inmovilización de microplásticos: puede ser una solución temporal para evitar que se dispersen en el medio ambiente. Por ejemplo a través del uso de agentes coagulantes o floculantes para precipitar microplásticos del agua, estos agentes pueden utilizarse para eliminar microplásticos del agua de riego o del agua residual antes de que se vierta en el medio ambiente.⁽¹³⁾
- Mejoramiento de la gestión de residuos: Es fundamental mejorar la gestión de residuos, especialmente en lo que respecta a la recolección y el reciclaje de plásticos. Esto implica implementar sistemas eficientes de separación de residuos, promover la recolección selectiva y establecer infraestructuras de reciclaje adecuadas como establecer sistemas de recogida eficientes, o recogida puerta a puerta de residuos plásticos o instalar contenedores de reciclaje de residuos plásticos en los grandes centros de población. Asimismo, se debe trabajar en la concienciación y educación de la población sobre la importancia de desechar correctamente los plásticos y evitar su disposición en el medio ambiente.^(4,13)
- Fomento de la economía circular: La transición hacia una economía circular, en la cual los recursos se utilizan de manera más eficiente y se minimiza la generación de residuos es una estrategia clave para abordar el problema de los microplásticos. Esto implica promover la reutilización, el reciclaje y el diseño de productos más duraderos y fácilmente reciclables.^(19,4)
- Investigación y desarrollo de materiales alternativos: Es necesario impulsar la investigación y el desarrollo de materiales alternativos al plástico, como bioplásticos, materiales biodegradables y compostables. Estos materiales pueden ofrecer una alternativa más sostenible y reducir la acumulación de microplásticos en el medio ambiente.⁽⁴⁾
- Concienciación y educación: La concienciación y educación de la población son fundamentales para promover cambios en los hábitos de consumo y el manejo de residuos. Es necesario informar a las personas sobre los impactos ambientales del microplástico y fomentar prácticas sostenibles en su vida diaria.^(4,19)
- Regulaciones y políticas gubernamentales: Los gobiernos desempeñan un papel crucial en la

reducción del daño del microplástico mediante la implementación de regulaciones y políticas efectivas. Esto puede incluir la prohibición o restricción de ciertos productos plásticos de un solo uso, la promoción de estándares de gestión de residuos más estrictos y el establecimiento de incentivos para la adopción de alternativas sostenibles. Este tema se profundizará más adelante.^(4,19,24)

También es importante la implementación de métodos para la recuperación y eliminación de los microplásticos, los mismo se detallan a continuación.

Métodos físicos de eliminación

Diferentes métodos físicos de supresión son empleados para su eliminación en las plantas tratadoras de aguas residuales. A continuación, se describen los procesos físicos más ampliamente utilizados:

- La filtración mecánica implica el uso de filtros físicos para atrapar partículas de plástico de diferentes tamaños. Los filtros pueden ser diseñados con poros de tamaño específico para capturar MP y NP mientras permiten el paso de agua. Este método es efectivo para eliminar una amplia gama de partículas de plástico, pero la eficiencia puede verse afectada por la obstrucción de los poros y la necesidad de limpieza regular.⁽¹⁵⁾
- La centrifugación aprovecha la fuerza centrífuga para separar las partículas de plástico del agua. Funciona bien para partículas de mayor tamaño, pero puede ser menos eficiente para NP debido a su masa y densidad comparativamente más baja.⁽¹⁵⁾
- La flotación es utilizada debido a la posibilidad de ser algunos MP y NP menos densos que el agua y por ende flotar en la superficie. La flotación asistida por aire o la adición de agentes químicos puede facilitar la separación de estos plásticos para su posterior eliminación.⁽¹⁵⁾ Estos métodos físicos de eliminación de MP y NP son esenciales para abordar la contaminación plástica. Sin embargo, enfrentan desafíos como la eficacia, pudiendo variar esta según el tamaño, forma y densidad de las partículas de plástico; algunos métodos pueden incluso ser costosos de implementar a gran escala, lo cual limita su viabilidad para aplicaciones prácticas.

Métodos químicos de eliminación

A continuación, se describen los métodos químicos utilizados para la remoción de estos contaminantes emergentes:

- La coagulación-floculación es un proceso químico utilizado comúnmente en el tratamiento de aguas residuales para remover partículas suspendidas. Consiste en la adición de coagulantes, como sales de hierro o aluminio, seguido de floculantes para promover la formación de agregados, los cuales pueden ser fácilmente removidos por sedimentación o filtración. Este método ha demostrado ser efectivo en la remoción de MP y NP mediante la formación de flocúlos atrapando las partículas plásticas. Sin embargo, su eficacia varía dependiendo de las características de los plásticos y de las condiciones del agua generando subproductos no deseados.
- La adsorción es un proceso mediante el cual las partículas o moléculas se adhieren a la superficie de un material sólido, conocido como adsorbente. En el contexto de la remoción de MP y NP, se han investigado diversos adsorbentes como carbón activado, zeolitas, polímeros modificados y nanomateriales. Estos materiales pueden ofrecer una alta capacidad de adsorción y selectividad hacia los plásticos, pero su eficacia puede verse afectada por factores como la concentración de plásticos en el agua y la presencia de compuestos orgánicos competidores.
- Los procesos de oxidación avanzada (POA) implican la generación in situ de especies oxidantes altamente reactivas como los radicales hidroxilos y superóxido para degradar compuestos orgánicos recalcitrantes en el agua. Este enfoque se ha explorado para la remoción de MP y NP mediante la ruptura de enlaces químicos en la estructura de los plásticos. Sin embargo, la aplicación de la oxidación avanzada para este fin aún enfrenta desafíos relacionados con la selectividad y la eficiencia de la degradación, así como la generación de subproductos tóxicos. La fotocatalisis, un POA, utiliza óxidos de elementos semiconductores activados por luz ultravioleta o visible para generar radicales libres que pueden oxidar contaminantes orgánicos en el agua. Aunque la fotocatalisis muestra potencial para la degradación de plásticos, su eficacia puede verse limitada por la disponibilidad de luz solar y la necesidad de mantener condiciones específicas de pH y temperatura.

Los métodos químicos ofrecen diversas estrategias para la remoción de MP y NP en agua, cada uno con sus propias ventajas y limitaciones. No obstante, se requiere más investigación para mejorar la eficacia, selectividad y sostenibilidad de estos enfoques.⁽¹⁵⁾

Métodos biológicos de eliminación

Los métodos biológicos y biotecnológicos emergen como prometedores enfoques para la eliminación de MP y NP del medio ambiente. Dentro de los principales métodos de eliminación biológica se encuentra la biodegradación por microorganismos como el uso de microalgas, hongos, bacterias e incluso algunos insectos.

- En la bioacumulación y biodegradación los organismos como bacterias, hongos y microalgas tienen la capacidad de degradar o acumular fragmentos de plásticos, transformándolos en productos menos dañinos o eliminándolos completamente. Además, las microalgas pueden absorber partículas de plástico debido a la generación de enzimas antioxidantes, las cuales excretan sustancias poliméricas capaces de interactuar con los MP y NP. Sin embargo, algunas microalgas sufren efectos tóxicos derivados de los MP inhibiendo la actividad de la misma alga.

- La ingeniería genética también desempeña un papel crucial en el desarrollo de soluciones biotecnológicas para la eliminación de MP y NP. Mediante la modificación genética de microorganismos, es posible potenciar sus capacidades para degradar plásticos de manera más eficiente. Recientemente, investigadores han desarrollado cepas bacterianas modificadas genéticamente, las cuales producen enzimas especializadas en la degradación de polímeros plásticos en componentes más simples, facilitando su eliminación del medio ambiente.

- En la biotecnología se han explorado métodos basados en nanomateriales para la captura y remoción de partículas plásticas. Nanopartículas funcionalizadas con grupos químicos específicos pueden atraer y atrapar MP en el agua, permitiendo su posterior recolección. El objetivo del uso de material biológico para la degradación de MP y NP en la biotecnología es aprovechar la generación de enzimas extracelulares cuando los microorganismos forman colonias sobre la superficie de los MP o NP, pudiendo permitir despolimerizarse las cadenas largas y así generar compuestos aprovechables para el medioambiente. Además, los procesos biotecnológicos son tecnologías con ventajas amigables para el medioambiente. No obstante, es de suma importancia generar las condiciones adecuadas de pH, temperatura, intensidad de luz y humedad, para favorecer el crecimiento de estos microorganismos.^(15,29,30)

- Modelos de evaluación de las estrategias de mitigación: para evaluar la eficacia de las diferentes estrategias de mitigación, se pueden utilizar modelos matemáticos o simulaciones computacionales. Estos modelos pueden tener en cuenta factores como la cantidad de microplásticos generados, el tipo de microplásticos, el medio ambiente en el que se liberan y las condiciones climáticas. Los modelos de evaluación son herramientas importantes para identificar las estrategias de mitigación más eficaces. Los siguientes factores a tener en cuenta pueden ser: la determinación de la cantidad de microplásticos generados; para reconocer la magnitud del problema., también la caracterización del tipo de microplásticos, ya que los diferentes tipos de microplásticos pueden tener diferentes impactos ambientales.

Estas estrategias de mitigación son solo algunas de las posibles soluciones. Se requieren más investigaciones para evaluar su eficacia y para desarrollar nuevas estrategias que sean más eficientes y sostenibles.⁽²¹⁾

Normativa actual

Organización de las Naciones Unidas (ONU): Por parte de este organismo, es ONU Medioambiente (United Nations Environment Programme) quien está promoviendo la mayor parte de los estudios, guías y recomendaciones para afrontar el problema y prevenir sus consecuencias, principalmente en el entorno marino. Por un lado, destacan dos guías de 2015 y 2016 que se centran en los residuos plásticos, describiendo la problemática y los posibles abordajes para la investigación y las políticas medioambientales. Por otro lado, también destacan dos informes publicados por GESAMP (Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection) sobre el origen y efecto de los microplásticos, también en el entorno marino. Tal es la implicación, que se prevé desarrollar una serie de talleres para concienciar sobre la contaminación marina debida a los plásticos acumulados, y compartir tanto las buenas prácticas para la gestión de los residuos plásticos como las políticas nacionales y las estrategias de reducción en la generación de microplásticos.

La Oficina Regional de la OMS de Europa publicó en septiembre de 2017 un documento de apoyo para la actualización de la Directiva europea relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano, que sustituirá a la Directiva 98/83/CE. En estas recomendaciones, no se menciona a los microplásticos, aunque sí a los nanomateriales, indicando que no hay medios adecuados para su medición o estandarización, y delegando su control en la legislación relativa a los materiales en contacto con el agua.

Unión Europea (UE). De momento, la UE está realizando una aproximación principalmente dirigida al riesgo medioambiental y, en menor medida, al ámbito de la salud y la protección del consumidor. De hecho, en 2018 la Comisión Europea publicó la comunicación: A European Strategy for Plastics in a Circular Economy que, aunque no tiene valor normativo, sí planteaba las directrices y prioridades a trasladar a las políticas medioambientales de cada estado miembro. Contempla un apartado específico sobre los microplásticos, describiendo su problemática

y proponiendo acciones para disminuir su impacto en el medio ambiente y, en especial, en el medio marino. Entre otras medidas, recomendaba la mejora del tratamiento de las aguas residuales. Por otro lado, también destacaba la necesidad de monitorizar los microplásticos en el agua de consumo humano debido a su potencial efecto sobre la salud. En parte como consecuencia de la adopción de esta estrategia, el Parlamento Europeo llegó a un acuerdo para, entre otras medidas, prohibir algunos productos plásticos de un solo uso (cubiertos, platos, pajitas, etc.), incentivar a la industria para desarrollar nuevos materiales, y concienciar a la población sobre el impacto medioambiental de los residuos plásticos.

La Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas (ECHA) también publicó en 2018 el monográfico *Note on substance identification and the potential scope of a restriction on uses of microplastics*, para valorar su inclusión en el Reglamento relativo al registro, evaluación, autorización y restricción de sustancias y mezclas químicas (REACH). Además, hizo un llamamiento para recopilar evidencias científicas que avalasen sus recomendaciones a la Comisión Europea respecto a la restricción en el uso de microplásticos. Como resultado de estas acciones, en enero de 2019 presentó una propuesta para restringir el uso de microplásticos añadidos intencionadamente en mezclas de sustancias empleadas en medicina, productos cosméticos y de higiene, pinturas, revestimientos, materiales de construcción o agricultura. Mediante esta medida, se pretende reducir hasta cuatrocientas mil toneladas de microplásticos en los próximos 20 años, especialmente en el medio terrestre. De hecho, algunos estados miembros de la Unión Europea (Francia primero en julio de 2016, Reino Unido y Suecia después), ya se postularon como pioneros en legislar contra la fabricación y comercialización de productos que contuvieran microesferas plásticas. Dada la libre circulación transfronteriza entre estados miembros, instaron a la Comisión Europea a secundar esta propuesta mediante una normativa comunitaria. Por su parte, la industria que emplea estos materiales está buscando alternativas como minerales y sales naturales que los sustituyan.

La Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA), publicó en 2018 el informe sobre el estado del agua *European Waters. Assessment of status and pressures* y, a pesar de que en la nota de prensa donde se anunciaba su publicación se mencionaba la preocupación por los microplásticos, estos no aparecían en el informe. En el mismo solo se citaban los microcontaminantes, poniendo como ejemplo el control que Suiza ejerce sobre ellos en las aguas residuales. Tal y como se ha mencionado previamente, ya está disponible el borrador de la nueva Directiva relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano, que sustituirá a la Directiva 98/83/CE. Llama la atención que, a pesar de los antecedentes, tampoco aquí se hace mención de los microplásticos, aunque sí se incorporan nuevos contaminantes como los disruptores hormonales, que pueden proceder de la degradación de plásticos o de sus materias primas.

Otros países: Países con destacada actividad en Salud Pública, como EEUU, Canadá, Australia o Japón, también consideran los microplásticos como un riesgo emergente. Sus respectivas agencias o ministerios con competencias medioambientales han publicado informes y guías al respecto, donde se destaca el impacto presente y futuro. En el caso de EEUU, mediante el reglamento *National Primary Drinking Water Regulations* se dictaron los parámetros a controlar en sistemas públicos de agua. Aunque en ellos no se contempla el plástico como contaminante, sí se tuvo en cuenta el cloruro de vinilo, el estireno o el cianuro, todos ellos como parte de vertidos en la fabricación de plásticos. Dado que hay contaminantes no recogidos en esta normativa relativa al agua de consumo humano, se creó la Norma de monitorización de contaminantes no regulados, en la cual se estableció la recogida de 30 contaminantes distintos cada cinco años en pequeñas zonas de abastecimiento de hasta 10 000 habitantes. Los resultados sirven como fuente de información y consulta de contaminantes para la Agencia de Protección Ambiental (EPA), así como para otros organismos.

De hecho, la EPA desarrolló una línea de investigación denominada *Trashfree Waters* que confirmó la presencia extensiva de plásticos en el medio marino. Afirmaba que aproximadamente el 90 % de plástico que se encuentra en este medio es en forma de microplástico y le atribuyó un potencial tóxico por su persistencia y por su capacidad adsorbente de sustancias tóxicas, persistentes y bioacumulativas (TPBs), las cuales tienen naturaleza hidrofóbica. Canadá también legisló contra la presencia de microesferas en los cosméticos y en los productos de limpieza, al considerarlas una amenaza medioambiental. Ha prohibido la venta o importación de productos que las contuvieran y se marcó como objetivo alcanzar un porcentaje cero de residuos plásticos en forma de microesferas a medio plazo, aplicando para ello el Reglamento sobre Microesferas en Productos de Aseo *Microbeads Toiletries Regulations*.

Respecto al agua de consumo humano, la legislación en vigor relacionada con los plásticos sólo hace referencia a las condiciones de fabricación y composición de los envases y a los materiales de los depósitos o cisternas destinados al agua potable. En Australia, la normativa de agua de consumo *Australian Drinking Water Guidelines*, como en los casos anteriores, solo tiene en cuenta el plástico como origen de contaminantes, no como contaminante o residuo en sí. Desde el departamento de Medio Ambiente y Energía (*Department of Environment and Energy*) también se impulsó el trabajo conjunto con la industria y las administraciones centrales y regionales, para asegurar la eliminación voluntaria de las microesferas en la formulación de cosméticos y en productos de higiene personal. En el caso de Japón, el Ministerio de Medio Ambiente trata el problema del desecho marino de microplásticos como un problema de sensibilización global. Se urgió a

tomar medidas para reducir la cantidad de plásticos en el medio marino, mediante un abordaje armonizado en cuanto a metodología de muestreo, modo y tiempo de uso de las redes, mapeo y distribución de zonas en la superficie del agua o los tipos de polímero a identificar. Se tuvo en cuenta no sólo el impacto medioambiental sino también el potencial impacto en la salud.⁽²⁰⁾

Marco legal argentino

La creciente preocupación por la contaminación ambiental producto de los residuos plásticos tuvo su repercusión en el ámbito legislativo a nivel nacional. Durante el 2018 ingresaron a las comisiones de las cámaras del Congreso Nacional –relacionadas con temas ambientales y recursos naturales– proyectos que reflejan preocupación sobre temas como la contaminación marina con residuos plásticos y la gestión de envases post consumo (Albareda 2019, citado en Informe ambiental, 2019). A lo largo del año 2019 se realizaron adelantos significativos en materia legal en lo que respecta a la prohibición de la incorporación intencional de microplásticos en productos cosméticos y de higiene oral de uso odontológica.

El aumento poblacional, la modificación de los patrones de consumo y la oferta de alimentos cada vez más procesados son causales de los actuales niveles de generación de residuos. Actualmente se observa un incremento en la fracción de materiales plásticos y uno de los principales componentes de los residuos son los envases. Por esta razón, Argentina inicia la búsqueda de proyectos de ley para la gestión de envases, entre otras cosas. Los proyectos se enmarcan en el principio de responsabilidad extendida del productor, con el objeto de responsabilizar al fabricante de sus propios productos a lo largo de su ciclo de vida, especialmente en su recuperación, reciclaje o disposición final.⁽²²⁾

CONCLUSIONES

La evidencia científica actual demuestra con claridad que los micro y nanoplásticos constituyen una amenaza ambiental y sanitaria creciente, cuya complejidad requiere un enfoque multidisciplinario y global. Su presencia ubicua en los ecosistemas y en el cuerpo humano, sumada a sus propiedades físicas y químicas, los convierte en contaminantes emergentes con efectos potencialmente graves sobre diversos órganos y sistemas, incluidos el endocrino, nervioso, respiratorio, cardiovascular y reproductivo. A pesar de los avances en su estudio, persisten importantes vacíos de conocimiento, especialmente en lo que respecta a los mecanismos de toxicidad, la exposición crónica y la interacción con otras sustancias químicas.

Frente a este panorama, resulta imprescindible fortalecer la investigación científica, el desarrollo de tecnologías de detección más precisas y la implementación de estrategias de mitigación eficaces, tanto a nivel local como internacional. Asimismo, se destaca la importancia de políticas públicas robustas, marcos normativos actualizados, educación ambiental y cambios en los patrones de consumo, que permitan reducir la producción de plásticos y fomentar una economía circular. Solo a través de un compromiso conjunto entre gobiernos, industria, comunidad científica y ciudadanía, será posible enfrentar este desafío con la urgencia y profundidad que demanda, protegiendo así la salud humana y la integridad del planeta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Rosado Sanz A, Rodriguez Rivas LI, Zofio Salvador V, Ferrer Caraco E, Carranza Egaña I. Microplásticos: su toxicidad y valores alerta pendientes de establecer. *Eurifins Environment Testing*. Julio-Agosto 2021.
2. Akanyange SN, Lyu X, Zhao X, Li X, Zhang Y, Crittenden JC, et al. Does microplastic really represent a threat? A review of the atmospheric contamination sources and potential impacts. *Sci Total Environ*. 2021;777:146020. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721010871>
3. Zhao B, Rehati P, Yang Z, Cai Z, Guo C, Li Y. The potential toxicity of microplastics on human health. *Sci Total Environ*. 2024;912:168946. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168946>
4. Perilla-Portilla FE, Quiroz Ortega JF. Microplásticos, una amenaza invisible para la salud humana y el medio ambiente. *Rev Cubana Salud Pública*. 2023;49(4):e18019. Disponible en: <https://revsaludpublica.sld.cu/index.php/spu/article/view/18019>
5. Hahladakis NJ, Velis CA, Weber R, Iacovidou E, Purnell P. An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *J Hazard Mater*. 2018;344:179-99. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030438941730763X>
6. Liu H, Xiang Y, He D, Li Y, Zhao Y, Wang S, et al. Leaching behavior of fluorescent additives from microplastics and the toxicity of leachate to *Chlorella vulgaris*. *Sci Total Environ*. 2019;678:1-9. Disponible en: <https://www>

sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719319527

7. Hardman R. A Toxicologic Review of Quantum Dots: Toxicity Depends on Physicochemical and Environmental Factors. *Environ Health Perspect.* 2016;114(2):147-A126. Disponible en: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/full/10.1289/ehp.8284>

8. Prata JC, da Costa JP, Lopes I, Duarte AC, Rocha-Santos T. Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects. *Sci Total Environ.* 2020;702:134455. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134455>

9. Lehner R, Weder C, Petri-Fink A, Rothen-Rutishauser B. Emergence of nanoplastic in the environment and possible impact on human health. *Environ Sci Technol.* 2019;53(4):1748-65. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.8b05512>

10. Marturano V, Cerruti P, Ambrogi V. Polymer additives. *Phys Sci Rev.* 2017;2. Disponible en: <https://doi.org/10.1515/psr-2016-0130>

11. Shen M, Zeng Z, Song B, Yi H, Hu T, Zhang Y, et al. Neglected microplastics pollution in global COVID-19: Disposable surgical masks. *Sci Total Environ.* 2021;790:148130. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148130>

12. Geyer R, Jambeck JR, Law KL. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci Adv.* 2017;3:e1700782. Disponible en: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1700782>

13. Song J, Cui S, Li P, Mingrui L. Progress on Ecotoxicological Effects of MicroPlastics Loaded Pollutants. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.* 2018;186(3):012027. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/186/3/012027/meta>

14. Sorci G, Loiseau C. Should we worry about the accumulation of microplastics in human organs? *eBioMedicine.* 2022;82:104191. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2022.104191>

15. Ruíz-Santoyo V, Cruz-Mérida J, García Carvajal S, Arenas Arrocena MC. Microplásticos y nanoplásticos: una amenaza para la salud humana y el medio ambiente. *Mundo Nano.* 2025;18(34):1e-26e. Disponible en: <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2025.34.69832>

16. Perilla-Portilla FE, Quiroz Ortega JF. Microplásticos, una amenaza invisible para la salud humana y ambiente. *Rev Cubana Salud Pública.* 2023;49(4):e18019. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/380397868>

17. Ke D, Zheng J, Liu X, Xu X, Zhao L, Gu Y, et al. Occurrence of microplastics and disturbance of gut microbiota: a pilot study of preschool children in Xiamen, China. *eBioMedicine.* 2023;97:104828. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2023.104828>

18. Gaspar L, Bartman S, Coppotelli G, Ross JM. Acute Exposure to Microplastics Induced Changes in Behavior and Inflammation in Young and Old Mice. *Int J Mol Sci.* 2023;24:12308. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijms241512308>

19. Ríos MF, Márquez F, Gatti M, Galván D, Bravo G, Bigatti G, et al. MICROPLÁSTICOS: MACROPROBLEMAS. Residuos plásticos en Argentina: su impacto ambiental y en el desafío de la economía. 1a ed. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: ANCEF; 2020. ISBN: 978-987-4111-15-9. Disponible en: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/12991>

20. Bollaín Pastor C, Vicente Agulló D. Presencia de microplásticos en aguas y su potencial impacto en la salud pública. *Rev Esp Salud Pública.* 2019;93:e201908064. Disponible en: <https://www.scielosp.org/article/resp/2019.v93/e201908064/>

21. Gamarra-Jiménez AI, Salazar-Sánchez MR. Microplásticos en cuerpos de agua continentales: Revisión de literatura sobre impactos y estrategias de mitigación desde la perspectiva de la ingeniería agroindustrial. *BISTUA Rev FCB.* 2024;22(1). Disponible en: <https://doi.org/10.24054/bistua.v22i1.2901>

22. León Pulido J, Santillán Corrales L, Lacava JE, editores. Microplásticos: identificación de pequeñas partículas con grandes impactos en las playas arenosas de Lima, Buenos Aires y Cartagena. 1a ed. Bogotá: Universidad Ean; 2024. 111 p. ISBN: 9789587567076. Disponible en: <https://repository.universidadean.edu.co/items/d164c0b7-86d9-4081-9104-dd81235dc463>

23. Castañeta G, Gutiérrez AF, Nacaratte F, Manzano CA. Microplásticos: un contaminante que crece en todas las esferas ambientales, sus características y posibles riesgos para la salud pública por exposición. *Rev Boliv Quím*. 2020;37(3):160-75. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=426365043004>

24. Kim Y, Jeong J, Lee S, Choi I, Choi J. Identification of adverse outcome pathway related to high-density polyethylene microplastics exposure: *Caenorhabditis elegans* transcription factor RNAi screening and zebrafish study. *J Hazard Mater*. 2020;388:121725. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030438941931679>

25. Zhu L, Zhu J, Zuo R, Xu Q, Qian Y, An L. Identification of microplastics in human placenta using laser direct infrared spectroscopy. *Sci Total Environ*. 2023;856:159060. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722061599>

26. Flaws J, Damdimopoulou P, Patisaul HB, Gore A, Raetzman L, Vandenberg LN. *Plastics, EDCs & Health: A Guide for Public Interest Organizations and Policy-Makers on Endocrine Disrupting Chemicals & Plastics*. Endocrine Society and IPEN; Diciembre 2020.

27. Bayo J, Baeza-Martínez C, González-Pleiter M, García-Pachón E, López-Castellanos J, Doval M, et al. Respiramos plástico: detección de microplásticos en el sistema respiratorio humano. *Rev Salud Ambient*. 2024;24(1):107-16.

28. Zheng H, Vidili G, Casu G, Navarese EP, Sechi LA, Chen Y. Microplastics and nanoplastics in cardiovascular disease—a narrative review with worrying links. *Front Toxicol*. 2024;6:1479292. doi: 10.3389/ftox.2024.1479292

29. Anand U, Dey S, Bontempi E, Ducoli S, Vethaak AD, Dey A, et al. Biotechnological methods to remove microplastics: a review. *Environ Chem Lett*. 2023;21(3):1787-810. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01552-4>

30. Veluru S, Ramakrishna S. Biotechnological approaches: degradation and valorization of waste plastic to promote the circular economy. *Circular Economy*. 2024;3(1):100077. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cec.2024.100077>

31. Bennett ER, Panagiotakis I. *Microplastic in the Environment: Pattern and Process*. Environmental Contamination Remediation and Management. Cham: Springer; 2022. ISBN: 978-3-030-78627-4. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78627-4>.

32. Campo A. Towards respectful obstetric care. *South Health and Policy*. 2024; 1:398.

FINANCIACIÓN

Ninguna.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Estefanía Denise Wolfenson, Cristina Angelica Bustos.

Redacción - borrador original: Estefanía Denise Wolfenson, Cristina Angelica Bustos.

Redacción - revisión y edición: Estefanía Denise Wolfenson, Cristina Angelica Bustos.