

Microplásticos: Presencia y diseminación en el medio ambiente

Microplastics: Presence and dissemination in the environment

Anayansi Zaragoza-Estrada^{1*}, Anayansi Estrada-Monje², Erasto Armando Zaragoza-Contreras³

¹Universidad Iberoamericana campus León. Blvd. Jorge Vértiz Campero No. 1640, Fracciones Cañada de Alfaro, C.P. 37238 León, Gto. Correo electrónico: 180175-8@iberoleon.edu.mx

²Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas, A.C. Dirección de Investigación y soluciones tecnológicas. Calle Omega No. 201, Industrial Delta, León, Gto. México, C.P. 37545. Correo electrónico: aestrada@ciatec.mx, <https://orcid.org/0000-0001-7161-9095>

³Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. Ingeniería y Química de Materiales. Miguel de Cervantes No 120, complejo Industrial Chihuahua. Chihuahua, México. C.P. 31136. Correo electrónico: armando.zaragoza@cimav.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0003-3010-556X>

*Autor de correspondencia

Recibido: 7 de septiembre de 2022

Aceptado: 16 de diciembre de 2022

Publicado: 31 de enero de 2023

<https://doi.org/10.33064/iycuaa2023884100>

e4100

Resumen

Los microplásticos (MPs) constituyen un serio tema ambiental de la sociedad actual, producto del modo de vida moderno en el que todo ocurre a gran velocidad y donde los productos plásticos de un solo uso se han acumulado en todo el planeta. En este trabajo de revisión, se plantea la situación actual en cuestión de caracterización y las mejoras que son necesarias para su optimización. También se discuten los efectos de los MPs sobre el medio ambiente (agua, tierra y aire), las redes tróficas y los mecanismos a través de los cuales se pueden transferir de microorganismos a seres superiores, así como su efecto sobre el ser humano.

Palabras clave: Microplásticos; Polímeros; Contaminación; Medio ambiente; Red trófica

Abstract

Microplastics (MPs) constitute a serious environmental issue in today's society, a product of the modern way of life, in which everything happens at great speed and where single-use plastic products have contributed to dispersing plastics around the globe. In this review work, the current situation in terms of characterization and the improvements that are necessary for its optimization are presented. The effects of microplastics on the environment (water, land, and air), food webs and the mechanisms through which can be transferred from microorganisms to higher beings, as well as its effect on humans are also discussed.

Keywords: Microplastics; Polymers; Pollution; Environment; food web

Introducción

Se estima que para el 2017 se habían producido 8300 Tn métricas de materiales plásticos en el mundo. De estos, el 60% se encuentran acumulados en el medio ambiente (Geyer et al., 2017)

debido a su durabilidad y resistencia a la degradación son muy difíciles de asimilar a la naturaleza. La prevalencia de este tipo de contaminación es tal, que incluso se ha propuesto como un marcador de la era geológica actual (Zalasiewicz et al., 2016). Entre estos residuos plásticos, existe un grupo que ha sido de especial interés para los investigadores en años recientes: los microplásticos.



Ilustración 1 Acumulación de contaminantes plásticos cerca de los ambientes marinos.
Nota: foto de uso libre de www.pexels.com

Los MPs se definen como fragmentos de polímeros sintéticos provenientes del petróleo, de dimensiones menores a 5 mm, aunque no hay un consenso claro sobre el intervalo tamaños (Hartmann et al., 2019). Estos fueron identificados por primera vez en la década de los 1970's en muestras tomadas del Océano Atlántico y del Canal de Bristol, aunque el término no fue acuñado hasta 2004, por Thompson et al. Desde entonces, han sido encontrados en todos los ambientes marinos y terrestres estudiados, incluyendo las regiones polares (Obbard, 2018) y los abismos oceánicos (Zhao et al., 2022).

Los MPs pueden clasificarse en primarios o secundarios según su origen (Hartmann et al., 2019). Los primarios son aquellos que son producidos para aplicaciones como exfoliantes en productos cosméticos y para procesos de limpieza con chorro de aire, los cuales reemplazan materiales naturales. Debido a que el origen de los MPs primarios es fácil de rastrear, es más sencillo tomar medidas para evitar su propagación.

Por otro lado, los MPs secundarios provienen de la degradación mecánica y fotolítica de objetos plásticos de mayor tamaño (Hartmann et al., 2019). Durante la degradación fotolítica, la luz solar oxida la estructura química del plástico, causando rupturas en los enlaces que reducen su masa molecular. Como resultado, el plástico se vuelve frágil y se rompe en fragmentos pequeños. En el medio oceánico, los fragmentos también son sometidos a los efectos de la abrasión de las olas y otros sedimentos. Aún con todos estos mecanismos, la degradación total de los plásticos tarda varios cientos de años, provocando que estos fragmentos permanezcan en el medio ambiente por mucho tiempo más (Thompson et al., 2004).

Las fuentes de MPs secundarios incluyen: basura municipal, como bolsas, botellas y empaques plásticos, y cubiertos desechables; desechos de la industria pesquera, como boyas, cañas de pescar, redes, etc. Otras fuentes son los restos de otras industrias como guantes desechables, partes automovilísticas, aislantes o material de construcción (An et al., 2020). Debido a esta gran variedad de fuentes, es difícil definir el origen de este tipo de MPs, y las medidas para mitigarlos se vuelven más complicadas.

Por la gran variedad de orígenes de los MPs, no es de sorprender que estos contaminantes estén conformados por una gran variedad de materiales plásticos, entre los que se encuentran: Polietilentefalato (PET), poliésteres (PES), polietileno de alta densidad (HDPE), polietileno de baja densidad (LDPE), poli(cloruro de vinilo) (PVC), polipropileno (PP), poliamidas (PA), poliestireno (PS), copolímero acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), y politetrafluoroetileno (PTFE) (Picó & Barceló, 2019).

El objetivo de este trabajo es llamar la atención sobre el problema de la contaminación por MPs en diferentes ecosistemas que afectan la vida del ser humano y el entorno ecológico, especialmente acerca de los aspectos que aún no se entienden por completo, e instar a la investigación respecto a estos tópicos.

Microplásticos y su efecto sobre el ecosistema

Muestreo y análisis

Uno de los grandes retos que existen para el estudio de la contaminación por MPs es la ausencia de metodologías estandarizadas para la recolección y procesamiento de muestras (Razeghi et al., 2021). Esto vuelve difícil comparar resultados entre estudios y determinar con exactitud la cantidad de microplásticos presentes en el ambiente (Gong & Xie, 2020). La técnica común para tomar muestras de ambientes marinos es el uso de redes Neuston, Figura 2, por lo general con tamaños de malla de 1.0, 0.56 y 0.333 mm (Tokai et al., 2021). La técnica permite tomar muestras de grandes áreas; sin embargo, presenta varios inconvenientes: se colecta materia orgánica, no siempre es posible conocer el volumen exacto de agua estudiada debido a las corrientes, y el

tamaño de malla determina el límite de tamaño de los microplásticos que se toman en cuenta (Razeghi et al., 2021). En un estudio se encontró que, para la malla de 1 mm, sólo una cuarta parte de microplásticos de 1.0 a 3.0 mm que entraron a la red fueron retenidos (Tokai et al., 2021).

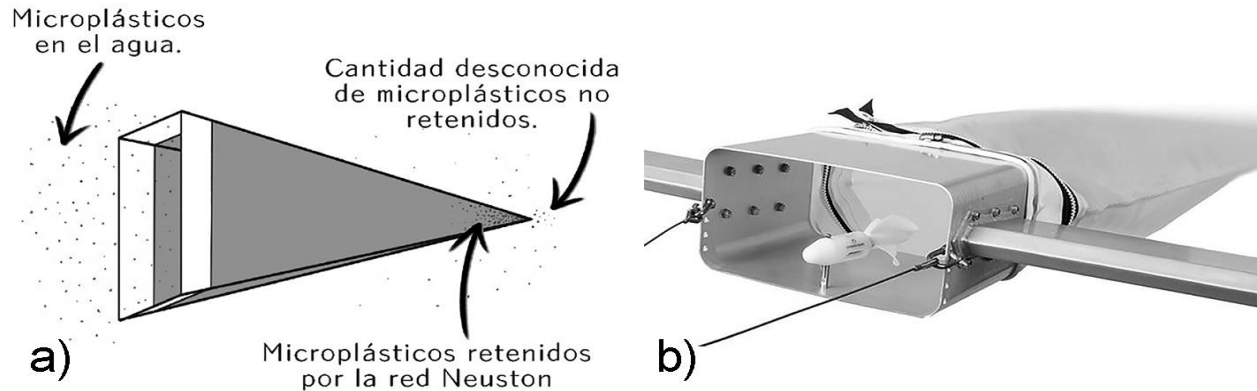


Figura 2. a) Toma de muestra de microplásticos con una red Neuston y b) ejemplo de una red de Neuston comercial

Las técnicas usadas para separar los MPs de la materia orgánica son separación por flotación y digestión enzimática, ácida o alcalina. Debido a que estas técnicas se basan en las características de los materiales, no son capaces de recuperar todos los MPs cuando en la muestra hay partículas que son más densas que otras o fibras, que serían degradadas en el proceso de digestión, Figura 2. De acuerdo con un estudio de 2018, un método con una eficiencia arriba del 50%, capaz de separar una mayor variedad de MPs, fue el uso de peróxido de hidrógeno como agente oxidante para la eliminación de la materia orgánica y posteriormente, separación por diferencia de densidades, utilizando cloruro de cinc ($ZnCl_2$) (Rodrigues et al., 2018), otros investigadores han reportado el mismo método con una eficiencia del 63% en la separación (Zheng et al., 2021).

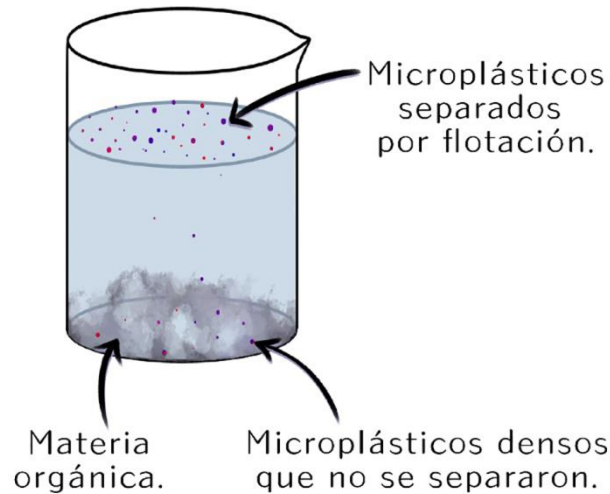


Figura 3. Separación por flotación de microplásticos y materia orgánica.

Tanto la toma de muestras, como los métodos de separación, excluyen una cantidad desconocida de MPs en cada estudio. Consecuentemente, es posible que se esté subestimando la cantidad real de estos contaminantes en el medio ambiente. En este sentido, un análisis comparativo de los métodos de muestreo dice que éste debe ser seleccionado en función de las condiciones reales de muestreo y el propósito de la investigación, considerando como regla principal que entre más grande sea el volumen de muestra de agua tomada, habrá mayor representatividad en el experimento.

Microplásticos en el medio ambiente y redes tróficas

Los MPs se encuentran en abundancia en ecosistemas acuáticos, afectando las redes tróficas. Un ejemplo de una red trófica marina es fitoplacton (productor primario) → zooplacton (consumidor primario) → sardina (consumidor secundario) → atún (depredador), se puede ver claramente cómo los MPs pueden llegar al hombre a través de las relaciones alimentarias entre las especies de organismos consumidos y consumidores.

Se ha visto que la presencia de MPs inhibe el crecimiento de las raíces de la planta acuática *Lemma minor*, y disminuye la capacidad de fotosíntesis de algas de los géneros *Chlorella* y *Scenedesmus*, además de aumentar la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) en ellas (Bhattacharya et al., 2010). Otro estudio describe la formación de agregados de MPs en las hojas del musgo *Sphagnum palustre*, que podría servir como bioindicador (Capozzi et al., 2018), y uno más señala que estos contaminantes pueden adherirse a la superficie de las algas marinas *Fucus vesiculosus* y ser ingeridos por moluscos de la especie *Littorina littorea*, entrando así a la red trófica (Gutow et al., 2016).

Copépodos y otros crustáceos planctónicos, base de las redes tróficas marinas, consumen MPs de forma regular. Se ha encontrado que su presencia disminuye significativamente la ingesta de su alimento usual, algas (Ogonowski et al., 2016). Se han encontrado altas concentraciones de MPs en los intestinos de moluscos, que los ingieren y absorben por sus branquias; además, fragmentos de tamaños menores a $9\ \mu\text{m}$ pueden entrar el sistema circulatorio, transferirse a otros órganos internos, e incluso ingresar a las células por endocitosis, causando reacciones inflamatorias (Kolandhasamy et al., 2018). Desde los años 1970's, existen reportes de la presencia de MPs en el sistema digestivo de peces adultos (Carpenter et al. 1972), y en estudios más recientes se reporta, además de la ingesta, la bioacumulación de MPs en otros órganos fuera del sistema digestivo (Ding et al., 2018).

Moluscos de la especie *Mytilus edulis* fueron expuestos a microesferas ($0.5\ \mu\text{m}$) de PS fluorescente; posteriormente, cangrejos de la especie *Carcinus maenas* fueron alimentados con estos moluscos, Figura 3. Las microesferas fueron encontradas en mayor concentración en las muestras tomadas 1 h después en los tejidos del hepatopáncreas y ovarios.

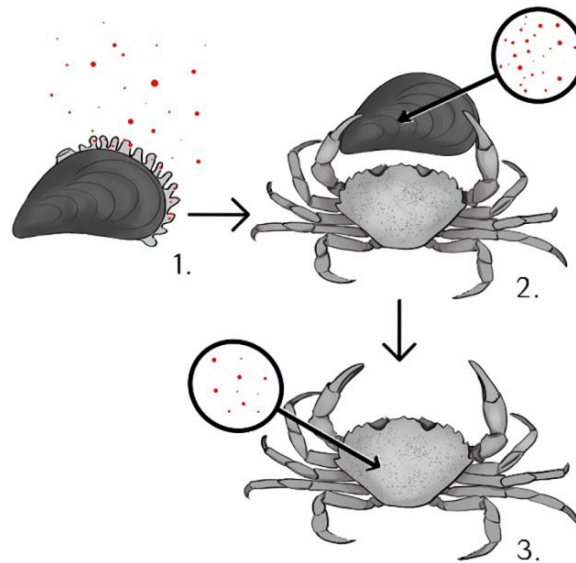


Figura 4. Transferencia trófica de MPs entre mejillones (*Mytilus edulis*) y cangrejos (*Carcinus maenas*), basado en el estudio realizado por Farrell & Nelson (2013). 1. Mejillón consumiendo microesferas de poliestireno. 2. Cangrejo alimentándose del mejillón, y 3. Microesferas de poliestireno encontradas en el organismo del cangrejo.

Las muestras de las branquias tuvieron una mayor concentración a las 2 h, las muestras del estómago tuvieron concentraciones muy altas a 1 h, 2 h y 4 h, pero no se encontraron en las muestras posteriores. En la hemolinfa, todas las muestras tomadas presentaron microesferas, con una mayor concentración a las 24 h, pero aún estando presentes 21 días después (Farrell & Nelson, 2013). En otro estudio realizado en moluscos de la misma especie,

se encontró que, tras la ingesta, los MPs se translocaban al sistema circulatorio en tres días, donde permanecieron por más de 28 días (Browne et al., 2008).

En el 2014, se expusieron comunidades de meso-zooplancton a microesferas de PS fluorescente de 10 μm ; luego, el meso-zooplancton se ofreció como alimento a crustáceos mísidos, que presentaron microesferas en el organismo (Setälä et al., 2014). En otro estudio, añadieron nanopartículas de PS de 24 nm a un cultivo de algas, que fueron utilizadas como alimento para zooplancton herbívoro; posteriormente, este zooplancton se ofreció como comida a peces. No sólo se encontró la presencia de nanopartículas en los peces, sino que también se observaron cambios en el comportamiento y metabolismo de estos (Cedervall et al., 2012). Existen reportes recientes que indican la transferencia trófica de nanoplasticos en organismos marinos y que éstas, eventualmente, pueden llegar a los recursos alimenticios consumidos por los humanos causando toxicidad (Kim et al., 2022).

A pesar de que muchos estudios se centran en los ambientes acuáticos, los MPs también se pueden encontrar en ambientes terrestres y en la atmósfera. En los ambientes terrestres, la mayoría de los MPs provienen de MPs secundarios (Scheurer & Bigalke, 2018), de los lodos residuales de plantas tratadoras de agua, de fibras textiles de acrílico y poliéster (Browne et al., 2011), y de mantillos en suelos agrícolas. Por otro lado, en áreas montañosas, los MPs provienen del turismo y del transporte atmosférico (Padha et al., 2022). Se sabe que altas concentraciones de MPs en el suelo disminuyen significativamente el crecimiento y aumentan la tasa de mortalidad de la lombriz de tierra común, *Lumbricus terrestris* (Huerta Lwanga et al., 2016), que son consumidos por distintas especies de protistas terrestres (Rillig & Bonkowski, 2018) y que se acumulan en los suelos junto con contaminantes tóxicos. Sin embargo, sus implicaciones para la salud humana y para el ecosistema aún no son claras (Wang et al., 2019).

Los MPs también se han encontrado en el aire, considerándose contaminantes atmosféricos (Zhang et al., 2020). En este caso, los MPs provienen principalmente de emisiones de tráfico (Kole et al., 2017) y de la industria textil (Dris et al., 2017). En su mayoría se originan en zonas urbanas, pero los mecanismos de transporte atmosférico y las corrientes de aire les permiten llegar a áreas remotas (Horton & Dixon, 2018; Liu et al., 2019).

Efecto de los microplásticos en la salud

El efecto biológico de la ingesta de MPs por crustáceos copépodos; es decir, zooplancton, depende de características como composición, tamaño y forma de las partículas. No obstante, su ingesta afecta el crecimiento y la capacidad reproductiva de los individuos (Bai et al., 2021). Además, los MPs pueden inducir la formación de especies reactivas de

oxígeno (ROS), posiblemente generando estrés oxidativo (Jeong et al., 2017). En estudios realizados en ratones, se encontró que micropartículas de PS de 5 y 20 μm , administradas en el agua, se acumularon en el hígado, riñones e intestinos y provocaron estrés oxidativo, alteraciones en el metabolismo de lípidos y en biomarcadores relacionados con neurotoxicidad (Deng et al., 2017). Además, pueden bio-acumularse en los testículos, afectando la capacidad reproductiva y provocando reacciones inflamatorias y de estrés oxidativo (D'Angelo & Meccariello, 2021).

Una de las grandes preocupaciones acerca de los MPs es su potencial toxicidad química. Algunos contaminantes plásticos contienen por sí mismos aditivos que se pueden desprender y afectar el ecosistema (Rochman, 2016). Los MPs, además, pueden servir como vectores para contaminantes orgánicos hidrofóbicos (HOCs) (Hartmann et al., 2017) como bifenilos policlorados y otros contaminantes orgánicos persistentes (POPs), así como pesticidas, hidrocarburos aromáticos policíclicos (Velzeboer et al., 2014) y metales (Hodson et al., 2017), aunque la tasa de adsorción de distintos metales varía debido a sus características (Massos & Turner, 2017). Respecto al efecto de sustancias tóxicas y MPs en organismos vivos, se ha reportado que ejemplares de peces cebra (*Danio rerio*) y de almejas de la especie *Scrobicularia plana*, no sufrieron daño físico en el tracto digestivo al ingerir MPs vírgenes, a pesar de que se presentó acumulación en los tejidos. Mientras que la ingesta de MPs que contenían POPs, sí causaron daño físico a los animales estudiados (O'Donovan et al., 2018), aunque el porcentaje de HOCs transportado por MPs es muy pequeño (Koelmans et al., 2016).

La transferencia trófica es una de las vías por las cuales los MPs ingresan al organismo humano, Figura 4. De acuerdo con un estudio de 2019, una persona adulta, viviendo en Estados Unidos, consume entre 40 y 60 mil micropartículas plásticas anualmente (Cox et al., 2019). Hay evidencia de MPs presentes en el tracto digestivo humano (Schwabl et al., 2019), proveniente de pescados y mariscos, aunque podrían encontrarse también en agua mineral (Schymanski et al., 2018), agua potable, cerveza y sal (Kosuth et al., 2018). Además, las micropartículas plásticas pueden adherirse a los alimentos durante el empaquetamiento y estar presentes en productos como la miel, la sal de mesa, el azúcar, la leche y el pescado. Como ya se mencionó, los MPs forman parte de la contaminación atmosférica, encontrándose en el polvo de los hogares, donde son inhalados por los seres humanos (Gasperi et al., 2018), llegando hasta los pulmones (Jenner et al., 2022). Además, se han encontrado micropartículas plásticas en el torrente sanguíneo y en la placenta humana (Leslie et al., 2022).

Es claro que los MPs se encuentran en el cuerpo humano, y por los estudios realizados en otros organismos, se sabe que pueden provocar reacciones del sistema inmune como toxicidad, estrés oxidativo, daño físico a los órganos, entre otros efectos nocivos. Aún así, falta mucha información para determinar su toxicidad y riesgos para la salud humana; por ejemplo, los niveles de exposición a los MPs, la cantidad de microplásticos que ingresan al cuerpo y la cantidad de ellos que se acumula, así como su capacidad para atravesar las barreras epiteliales (Blackburn & Green, 2022). De acuerdo con Picó y Barceló (2019), las estrategias que pueden utilizarse para disminuir la contaminación por MPs deben enfocarse en dos aspectos: control de las fuentes y remediación. El primero se refiere a la disminución de la cantidad de MPs generados, limitando la producción de MPs primarios y de residuos plásticos que pueden dar lugar a MPs secundarios, principalmente a través de legislaciones y de programas de concientización. Mientras que el segundo, busca eliminar los MPs ya existentes en el ambiente; en particular, en el océano y en los efluentes de aguas residuales.

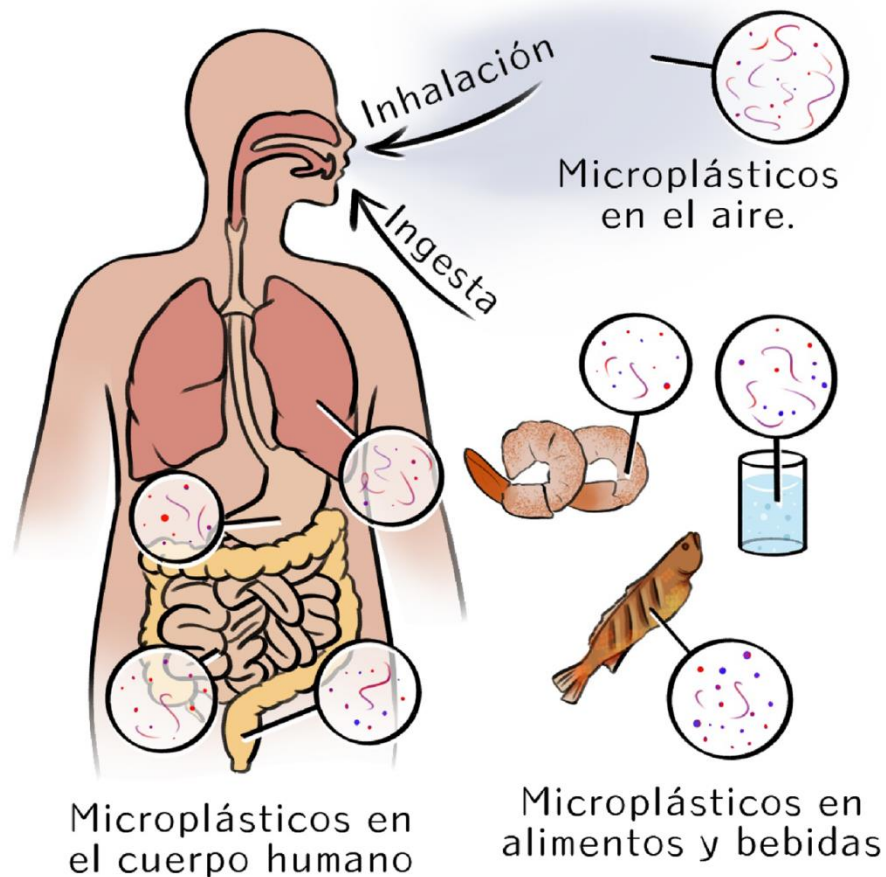


Figura 5. Mecanismos comunes de ingreso de los microplásticos al cuerpo humano.

Otra estrategia es el desarrollo de materiales plásticos bio-basados y compostables que pueden ser descompuestos en biomasa por la acción de microorganismos, de manera que no se acumulen en el ambiente ni den lugar a microplásticos secundarios. En este tema, es necesario tomar en cuenta que algunos materiales plásticos formulados para ser biodegradables, únicamente lo son bajo condiciones específicas o sólo se descomponen parcialmente en materiales que combinan componentes biodegradables con polímeros sintéticos, o formulaciones con aditivos destinados a facilitar la degradación. Lo anterior da lugar a MPs que no son más fáciles de asimilar por el medio ambiente y son incluso más difíciles de eliminar que los residuos plásticos de mayor tamaño (Cole et al., 2011). En este sentido, se ha creado el proyecto de fuga de plástico (PLP). Esta iniciativa mundial analiza a profundidad la economía circular de los plásticos, evalúa las lagunas de conocimiento existentes y desarrolla una guía metodológica para permitir a las empresas localizar y evaluar las fugas de plástico a lo largo de sus cadenas de suministro (Peano, 2021).

Conclusiones

Debido a que los MPs tienen una amplia distribución en todo el mundo, están afectando la salud de los organismos, y dado que se comprobó que se transfieren a través de la red trófica, pueden llegar hasta los seres humanos causando, eventualmente, toxicidad. Para mitigar el daño causado por los MP, es necesario reducir la emisión de contaminantes plásticos en general. Para este fin, son necesarias legislaciones sobre la producción y consumo de productos plásticos, en especial aquellos de un solo uso, y el desarrollo de nuevos y mejores materiales plásticos que no se acumulen en el ambiente. Desafortunadamente, en México no existe una Ley Federal o Nacional sobre plásticos de un solo uso; sin embargo, globalmente se están tomando medidas como el proyecto de fuga de plástico para identificar las lagunas de conocimiento existentes y dar trazabilidad a los plásticos, como lo han indicado expertos de la ONU en su informe de 2021, donde recomiendan reutilizar, reparar o reciclar los plásticos, así como la reducción de materiales vírgenes. Pero sobre todo, la educación y la participación del público también son indispensables para reducir la contaminación. Además, es necesario llegar a un consenso sobre el tamaño a la cual una partícula plástica se considera un MP e implementar metodologías estandarizadas para la toma, separación y análisis de muestras que los contengan, de tal manera que se pueda determinar con mayor precisión la cantidad de estos en el ambiente y sus posibles efectos en la salud humana.

Referencias

- An, L., Liu, Q., Deng, Y., Wu, W., Gao, Y., & Ling, W. (2020). Sources of Microplastic in the Environment (pp. 143–159). https://doi.org/10.1007/698_2020_449
- Bai, Z., Wang, N., & Wang, M. (2021). Effects of microplastics on marine copepods. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 217, 112243. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112243>
- Bhattacharya, P., Lin, S., Turner, J. P., & Ke, P. C. (2010). Physical Adsorption of Charged Plastic Nanoparticles Affects Algal Photosynthesis. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(39), 16556–16561. <https://doi.org/10.1021/jp1054759>
- Blackburn, K., & Green, D. (2022). The potential effects of microplastics on human health: What is known and what is unknown. *Ambio*, 51(3), 518–530. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01589-9>
- Browne, M. A., Crump, P., Niven, S. J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T., & Thompson, R. (2011). Accumulation of Microplastic on Shorelines Worldwide: Sources and Sinks. *Environmental Science & Technology*, 45(21), 9175–9179. <https://doi.org/10.1021/es201811s>
- Browne, M. A., Dissanayake, A., Galloway, T. S., Lowe, D. M., & Thompson, R. C. (2008). Ingested Microscopic Plastic Translocates to the Circulatory System of the Mussel, *Mytilus edulis* (L.). *Environmental Science & Technology*, 42(13), 5026–5031. <https://doi.org/10.1021/es800249a>
- Capozzi, F., Carotenuto, R., Giordano, S., & Spagnuolo, V. (2018). Evidence on the effectiveness of mosses for biomonitoring of microplastics in fresh water environment. *Chemosphere*, 205, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.074>
- Carpenter, E. J., Anderson, S. J., Harvey, G. R., Miklas, H. P., & Peck, B. B. (1972). Polystyrene Spherules in Coastal Waters. *Science*, 178(4062), 749–750. <https://doi.org/10.1126/science.178.4062.749>
- Cedervall, T., Hansson, L.-A., Lard, M., Frohm, B., & Linse, S. (2012). Food Chain Transport of Nanoparticles Affects Behaviour and Fat Metabolism in Fish. *PLoS ONE*, 7(2), e32254. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0032254>
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 62(12), 2588–2597. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>

- Cox, K. D., Covernton, G. A., Davies, H. L., Dower, J. F., Juanes, F., & Dudas, S. E. (2019). Human Consumption of Microplastics. *Environmental Science & Technology*, 53(12), 7068–7074. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01517>
- D'Angelo, S., & Meccariello, R. (2021). Microplastics: A Threat for Male Fertility. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(5), 2392. <https://doi.org/10.3390/ijerph18052392>
- Deng, Y., Zhang, Y., Lemos, B., & Ren, H. (2017). Tissue accumulation of microplastics in mice and biomarker responses suggest widespread health risks of exposure. *Scientific Reports*, 7(1), 46687. <https://doi.org/10.1038/srep46687>
- Ding, J., Zhang, S., Razanajatovo, R. M., Zou, H., & Zhu, W. (2018). Accumulation, tissue distribution, and biochemical effects of polystyrene microplastics in the freshwater fish red tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Environmental Pollution*, 238, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.03.001>
- Dris, R., Gasperi, J., Mirande, C., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V., & Tassin, B. (2017). A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environmental Pollution*, 221, 453–458. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013>
- Farrell, P., & Nelson, K. (2013). Trophic level transfer of microplastic: *Mytilus edulis* (L.) to *Carcinus maenas* (L.). *Environmental Pollution*, 177, 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.01.046>
- Gasperi, J., Wright, S. L., Dris, R., Collard, F., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V., Kelly, F. J., & Tassin, B. (2018). Microplastics in air: Are we breathing it in? *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 1, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.002>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Gong, J., & Xie, P. (2020). Research progress in sources, analytical methods, eco-environmental effects, and control measures of microplastics. *Chemosphere*, 254, 126790. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126790>
- Gutow, L., Eckerlebe, A., Giménez, L., & Saborowski, R. (2016). Experimental Evaluation of Seaweeds as a Vector for Microplastics into Marine Food Webs. *Environmental Science & Technology*, 50(2), 915–923. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02431>
- Hartmann, N. B., Rist, S., Bodin, J., Jensen, L. H., Schmidt, S. N., Mayer, P., Meibom, A., & Baun, A. (2017). Microplastics as vectors for environmental

contaminants: Exploring sorption, desorption, and transfer to biota. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 13(3), 488–493. <https://doi.org/10.1002/ieam.1904>

- Hodson, M. E., Duffus-Hodson, C. A., Clark, A., Prendergast-Miller, M. T., & Thorpe, K. L. (2017). Plastic Bag Derived-Microplastics as a Vector for Metal Exposure in Terrestrial Invertebrates. *Environmental Science & Technology*, 51(8), 4714–4721. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00635>
- Horton, A. A., & Dixon, S. J. (2018). Microplastics: An introduction to environmental transport processes. *WIREs Water*, 5(2). <https://doi.org/10.1002/wat2.1268>
- Huerta Lwanga, E., Gertsen, H., Gooren, H., Peters, P., Salánki, T., van der Ploeg, M., Besseling, E., Koelmans, A. A., & Geissen, V. (2016). Microplastics in the Terrestrial Ecosystem: Implications for *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta, Lumbricidae). *Environmental Science & Technology*, 50(5), 2685–2691. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05478>
- Jenner, L. C., Rotchell, J. M., Bennett, R. T., Cowen, M., Tentzeris, V., & Sadofsky, L. R. (2022). Detection of microplastics in human lung tissue using μ FTIR spectroscopy. *Science of The Total Environment*, 831, 154907. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154907>
- Jeong, C.-B., Kang, H.-M., Lee, M.-C., Kim, D.-H., Han, J., Hwang, D.-S., Souissi, S., Lee, S.-J., Shin, K.-H., Park, H. G., & Lee, J.-S. (2017). Adverse effects of microplastics and oxidative stress-induced MAPK/Nrf2 pathway-mediated defense mechanisms in the marine copepod *Paracyclopina nana*. *Scientific Reports*, 7(1), 41323. <https://doi.org/10.1038/srep41323>
- Kim, L., Cui, R., il Kwak, J., & An, Y.-J. (2022). Trophic transfer of nanoplastics through a microalgae–crustacean–small yellow croaker food chain: Inhibition of digestive enzyme activity in fish. *Journal of Hazardous Materials*, 440, 129715. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129715>
- Koelmans, A. A., Bakir, A., Burton, G. A., & Janssen, C. R. (2016). Microplastic as a Vector for Chemicals in the Aquatic Environment: Critical Review and Model-Supported Reinterpretation of Empirical Studies. *Environmental Science & Technology*, 50(7), 3315–3326. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b06069>
- Kolandhasamy, P., Su, L., Li, J., Qu, X., Jabeen, K., & Shi, H. (2018). Adherence of microplastics to soft tissue of mussels: A novel way to uptake microplastics beyond

ingestion. *Science of The Total Environment*, 610–611, 635–640. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.053>

- Kole, P. J., Löhr, A. J., van Belleghem, F., & Ragas, A. (2017). Wear and Tear of Tyres: A Stealthy Source of Microplastics in the Environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(10), 1265. <https://doi.org/10.3390/ijerph14101265>
- Kosuth, M., Mason, S. A., & Wattenberg, E. v. (2018). Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt. *PLOS ONE*, 13(4), e0194970. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194970>
- Leslie, H. A., van Velzen, M. J. M., Brandsma, S. H., Vethaak, A. D., Garcia-Vallejo, J. J., & Lamoree, M. H. (2022). Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*, 163, 107199. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107199>
- Liu, C., Li, J., Zhang, Y., Wang, L., Deng, J., Gao, Y., Yu, L., Zhang, J., & Sun, H. (2019). Widespread distribution of PET and PC microplastics in dust in urban China and their estimated human exposure. *Environment International*, 128, 116–124. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.04.024>
- Massos, A., & Turner, A. (2017). Cadmium, lead and bromine in beached microplastics. *Environmental Pollution*, 227, 139–145. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.04.034>
- Obbard, R. W. (2018). Microplastics in Polar Regions: The role of long range transport. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 1, 24–29. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.004>
- O'Donovan, S., Mestre, N. C., Abel, S., Fonseca, T. G., Carteny, C. C., Cormier, B., Keiter, S. H., & Bebianno, M. J. (2018). Ecotoxicological Effects of Chemical Contaminants Adsorbed to Microplastics in the Clam *Scrobicularia plana*. *Frontiers in Marine Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00143>
- Ogonowski, M., Schür, C., Jarsén, Å., & Gorokhova, E. (2016). The Effects of Natural and Anthropogenic Microparticles on Individual Fitness in *Daphnia magna*. *PLOS ONE*, 11(5), e0155063. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155063>
- Padha, S., Kumar, R., Dhar, A., & Sharma, P. (2022). Microplastic pollution in mountain terrains and foothills: A review on source, extraction, and distribution of microplastics in remote areas. *Environmental Research*, 207, 112232. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112232>
- Peano, L. (2021). *Plastic Leak Project, Methodological Guidelines*. Quantis.

- Picó, Y., & Barceló, D. (2019). Analysis and Prevention of Microplastics Pollution in Water: Current Perspectives and Future Directions. *ACS Omega*, 4(4), 6709–6719. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b00222>
- Razeghi, N., Hamidian, A. H., Wu, C., Zhang, Y., & Yang, M. (2021). Microplastic sampling techniques in freshwaters and sediments: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(6), 4225–4252. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01227-6>
- Rillig, M. C., & Bonkowski, M. (2018). Microplastic and soil protists: A call for research. *Environmental Pollution*, 241, 1128–1131. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.147>
- Rochman, C. M. (2016). *The Role of Plastic Debris as Another Source of Hazardous Chemicals in Lower-Trophic Level Organisms* (pp. 281–295). https://doi.org/10.1007/698_2016_17
- Rodrigues, M. O., Gonçalves, A. M. M., Gonçalves, F. J. M., Nogueira, H., Marques, J. C., & Abrantes, N. (2018). Effectiveness of a methodology of microplastics isolation for environmental monitoring in freshwater systems. *Ecological Indicators*, 89, 488–495. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.02.038>
- Scheurer, M., & Bigalke, M. (2018). Microplastics in Swiss Floodplain Soils. *Environmental Science & Technology*, 52(6), 3591–3598. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b06003>
- Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H.-U., & Fürst, P. (2018). Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research*, 129, 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.011>
- Setälä, O., Fleming-Lehtinen, V., & Lehtiniemi, M. (2014). Ingestion and transfer of microplastics in the planktonic food web. *Environmental Pollution*, 185, 77–83. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.013>
- Thompson, R. C., Olsen, Y., Mitchell, R. P., Davis, A., Rowland, S. J., John, A. W. G., McGonigle, D., & Russell, A. E. (2004). Lost at Sea: Where Is All the Plastic? *Science*, 304(5672), 838–838. <https://doi.org/10.1126/science.1094559>
- Tokai, T., Uchida, K., Kuroda, M., & Isobe, A. (2021). Mesh selectivity of neuston nets for microplastics. *Marine Pollution Bulletin*, 165, 112111. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112111>
- Velzeboer, I., Kwadijk, C. J. A. F., & Koelmans, A. A. (2014). Strong Sorption of PCBs to Nanoplastics, Microplastics, Carbon Nanotubes, and Fullerenes.

Environmental Science & Technology, 48(9), 4869–4876.
<https://doi.org/10.1021/es405721v>

- Wang, J., Liu, X., Li, Y., Powell, T., Wang, X., Wang, G., & Zhang, P. (2019). Microplastics as contaminants in the soil environment: A mini-review. *Science of The Total Environment*, 691, 848–857. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.209>
- Zalasiewicz, J., Waters, C. N., Ivar do Sul, J. A., Corcoran, P. L., Barnosky, A. D., Cearreta, A., Edgeworth, M., Gatuszka, A., Jeandel, C., Leinfelder, R., McNeill, J. R., Steffen, W., Summerhayes, C., Wagemich, M., Williams, M., Wolfe, A. P., & Yonon, Y. (2016). The geological cycle of plastics and their use as a stratigraphic indicator of the Anthropocene. *Anthropocene*, 13, 4–17. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2016.01.002>
- Zhang, Y., Kang, S., Allen, S., Allen, D., Gao, T., & Sillanpää, M. (2020). Atmospheric microplastics: A review on current status and perspectives. *Earth-Science Reviews*, 203, 103118. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103118>
- Zhao, S., Zettler, E. R., Bos, R. P., Lin, P., Amaral-Zettler, L. A., & Mincer, T. J. (2022). Large quantities of small microplastics permeate the surface ocean to abyssal depths in the South Atlantic Gyre. *Global Change Biology*, 28(9), 2991–3006. <https://doi.org/10.1111/gcb.16089>
- Zheng, Y., Li, J., Sun, C., Cao, W., Wang, M., Jiang, F., & Ju, P. (2021). Comparative study of three sampling methods for microplastics analysis in seawater. *Science of The Total Environment*, 765, 144495. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144495>