

Microplásticos: Presencia y diseminación en el medio ambiente

Microplastics: Presence and dissemination in the environment

Anayansi Zaragoza-Estrada*✉, Anayansi Estrada-Monje**, Erasto
Armando Zaragoza-Contreras***

Zaragoza-Estrada, A., Estrada-Monje, A., & Zaragoza-Contreras, E. A. (2023).
Microplásticos: Presencia y diseminación en el medio ambiente. Investigación
y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, 31(88), e4100,
<https://doi.org/10.33064/iycuaa2023884100>

RESUMEN

Los microplásticos (MP) 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 MP 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.

Recibido: 7 de septiembre de 2022 Aceptado: 16 de diciembre de 2022 Publicado: 31 de enero de 2023

*Universidad Iberoamericana campus León. Blvd. Jorge Vértiz Campero No. 1640, Fracciones Cañada de Alfaro, C. P. 37238, León, Gto., México. Correo electrónico: 180175-8@iberoleon.edu.mx ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7373-715X>

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

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

✉ Autor para correspondencia

Keywords: microplastics; polymers; pollution; environment; food web.

INTRODUCCIÓN

Se estima que para 2017 se habían producido 8,300 t de materiales plásticos en el mundo. De estos, 60% se encuentran acumulados en el medio ambiente (Geyer, Jambeck, & Law, 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.



Figura 1. Acumulación de contaminantes plásticos cerca de los ambientes marinos.
Imagen de uso libre tomada de Pexels.

Los MP se definen como fragmentos de polímeros sintéticos provenientes del petróleo, de dimensión menor a 5 mm, aunque no hay un consenso claro sobre el intervalo en tamaños (Hartmann et al., 2019). Éstos fueron identificados por primera vez en la década de los setenta en muestras tomadas del Océano Atlántico y del canal de Bristol, aunque el término no fue acuñado hasta Thompson et al. (2004). Desde entonces han sido encontrados en todos los ambientes marinos (figura 1) y terrestres estudiados, incluyendo las regiones polares (Obbard, 2018) y los abismos oceánicos (Zhao et al., 2022).

Los MP pueden clasificarse en primarios o secundarios según su origen (Hartmann et al., 2019). Los primarios 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 MP primarios es fácil de rastrear es más sencillo tomar medidas para evitar su propagación.

Por otro lado, los MP 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. Aun 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 MP secundarios incluyen basura municipal, como bolsas, botellas y empaques plásticos y cubiertos desechables; 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 MP y las medidas para mitigarlos se vuelven más complicadas.

Por la gran variedad de orígenes de los MP no es de sorprender que estos contaminantes estén conformados por una gran variedad de materiales plásticos, entre los que se encuentran polietilenteftalato (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 fue llamar la atención sobre el problema de la contaminación por MP 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 MP es la ausencia de metodologías estandarizadas para la recolección y procesamiento de muestras (Razeghi, Hamidian, Wu, Zhang, & Yang, 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 a y b), por lo general con tamaños de malla de 1.0, 0.56 y 0.333 mm (Tokai, Uchida, Kuroda, & Isobe, 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).

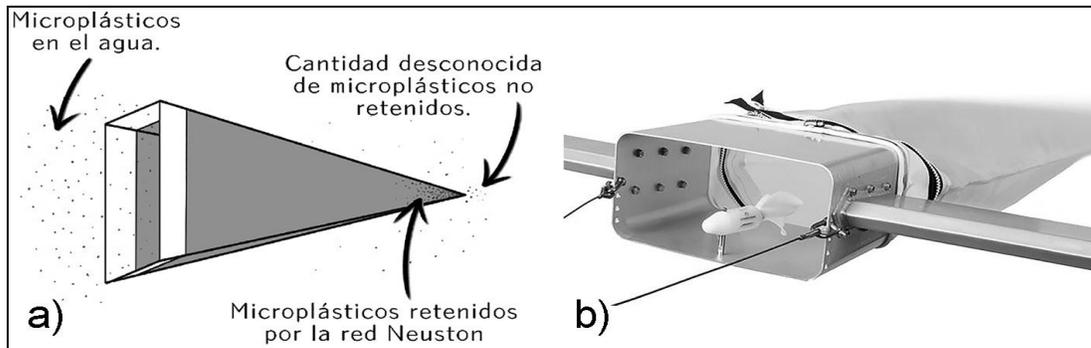


Figura 2. a) Toma de muestra de microplásticos con una red Neuston y b) ejemplo de una red de Neuston comercial.
Elaboración propia.

Las técnicas usadas para separar los MP 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 MP cuando en la muestra hay partículas que son más densas que otras o fibras, que serían degradadas en el proceso de digestión (figura 3). De acuerdo con un estudio de 2018 un método con una eficiencia arriba de 50% capaz de separar una mayor variedad de MP 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 ($ZnCl_2$) (Rodríguez et al., 2018); otros investigadores han reportado el mismo método con una eficiencia de 63% en la separación (Zheng et al., 2021).

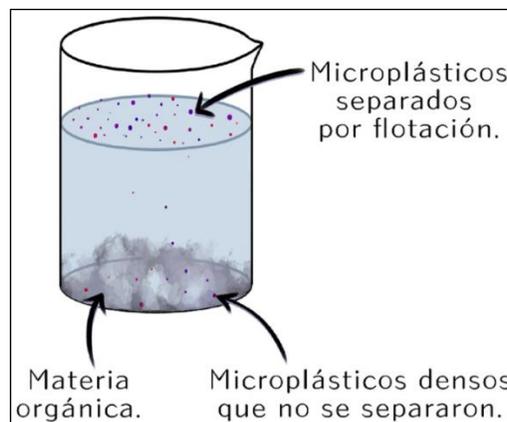


Figura 3. Separación por flotación de microplásticos y materia orgánica.
Elaboración propia.

Tanto la toma de muestras como los métodos de separación excluyen una cantidad desconocida de MP en cada estudio. Consecuentemente, es posible que se esté subestimando la cantidad real de estos contaminantes en el medio ambiente. 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 MP se encuentran en abundancia en ecosistemas acuáticos, lo que afecta 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 MP 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 MP 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, Lin, Turner, & Ke, 2010). Otro estudio describe la formación de agregados de MP en las hojas del musgo *Sphagnum palustre*, que podría servir como bioindicador (Capozzi, Carotenuto, Giordano, & Spagnuolo, 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, Eckerlebe, Giménez, & Saborowski, 2016).

Los copépodos y otros crustáceos planctónicos, base de las redes tróficas marinas, consumen MP de forma regular. Se ha encontrado que su presencia disminuye significativamente la ingesta de su alimento usual, algas (Ogonowski, Schür, Jarsén, & Gorokhova, 2016). Se han encontrado altas concentraciones de MP en los intestinos de moluscos, que los ingieren y absorben por las branquias; además, fragmentos de tamaños menores a 9 µm pueden entrar al sistema circulatorio, transferirse a otros órganos internos e incluso ingresar a las células por endocitosis, causando reacciones inflamatorias (Kolandhasamy et al., 2018). Desde la década de los setenta existen reportes de la presencia de MP en el sistema digestivo de peces adultos (Carpenter, Anderson, Harvey, Miklas, & Peck, 1972) y en estudios más recientes se reporta, además de la ingesta, la bioacumulación de MP en órganos fuera del sistema digestivo (Ding, Zhang, Razanajatovo, Zou, & Zhu, 2018).

Moluscos de la especie *Mytilus edulis* fueron expuestos a microesferas (0.5 µm) de PS fluorescente; posteriormente, cangrejos de la especie *Carcinus maenas* fueron alimentados con estos moluscos (figura 4). Las microesferas fueron encontradas en mayor concentración en las muestras tomadas 1 h después en los tejidos del hepatopáncreas y ovarios.

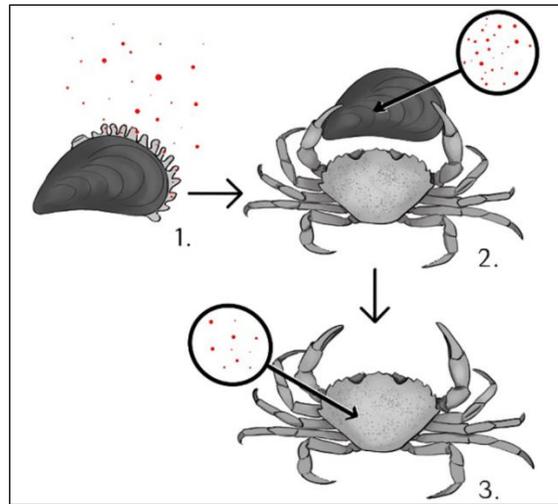


Figura 4. Transferencia trófica de MP entre mejillones (*M. edulis*) y cangrejos (*C. maenas*), basado en el estudio realizado por Farrell & Nelson (2013). 1) Mejillón consumiendo microesferas de poliestireno. 2) Cangrejo alimentándose del mejillón. 3) Microesferas de poliestireno encontradas en el organismo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

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 mayor concentración a las 24 h, pero presentes 21 días después (Farrell & Nelson, 2013). En otro estudio realizado en moluscos de la misma especie se encontró que, tras la ingesta, los MP se translocaban al sistema circulatorio en tres días, donde permanecieron por más de 28 días (Browne, Dissanayake, Galloway, Lowe, & Thompson, 2008).

En 2014 se expusieron comunidades de meso-zooplancton a microesferas de PS fluorescente de 10 μm ; después el meso-zooplancton se ofreció como alimento a crustáceos mísidos, que presentaron microesferas en el organismo (Setälä, Fleming-Lehtinen, & Lehtiniemi, 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, también se observaron cambios en el comportamiento y metabolismo de éstos (Cedervall, Hansson, Lard, Frohm, & Linse, 2012). Existen reportes recientes que indican la transferencia trófica de nanoplásticos en organismos marinos y que éstas, eventualmente, pueden llegar a los recursos alimenticios consumidos por los humanos, causando toxicidad (Kim, Cui, Kwak, & An, 2022).

A pesar de que muchos estudios se centran en los ambientes acuáticos, los MP también se pueden encontrar en ambientes terrestres y en la atmósfera. En los ambientes terrestres la mayoría de los MP provienen de MP secundarios (Scheurer & Bigalke, 2018), de 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 MP provienen del turismo y del transporte atmosférico (Padha, Kumar, Dhar, & Sharma, 2022). Se sabe que altas concentraciones de MP 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 MP también se han encontrado en el aire, considerándose contaminantes atmosféricos (Zhang et al., 2020). En este caso, los MP provienen principalmente de emisiones de tráfico (Kole, Löhr, van Belleghem, & Ragas, 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 MP 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, Wang, & Wang, 2021). Además, los MP 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, en riñones e intestinos y provocaron estrés oxidativo, alteraciones en el metabolismo de lípidos y en biomarcadores relacionados con neurotoxicidad (Deng, Zhang, Lemos, & Ren, 2017). Además, pueden bioacumularse 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 MP es su potencial toxicidad química. Algunos contaminantes plásticos contienen por sí mismos aditivos que se pueden desprender y afectar el ecosistema (Rochman, 2016). Los MP, además, pueden servir como vectores para contaminantes orgánicos hidrofóbicos (HOCs, en inglés) (Hartmann et al., 2017) como bifenilos policlorados y otros contaminantes orgánicos persistentes (POPs, en inglés), así como pesticidas, hidrocarburos aromáticos policíclicos (Velzeboer, Kwadijk, & Koelmans, 2014) y metales (Hodson, Duffus-Hodson, Clark, Prendergast-Miller, & Thorpe, 2017); aunque la tasa de adsorción de distintos metales varía debido a sus características (Massos & Turner, 2017).

Respecto al efecto de sustancias tóxicas y MP 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 MP vírgenes, a pesar de que se presentó acumulación en los tejidos; mientras que la ingesta de MP que contenían contaminantes orgánicos persistentes sí causó daño físico a los animales estudiados (O'Donovan et al., 2018), aunque el porcentaje de HOC transportado por MP es muy pequeño (Koelmans, Bakir, Burton, & Janssen, 2016).

La transferencia trófica es una de las vías por las cuales los MP ingresan al organismo humano (figura 5). De acuerdo con un estudio de 2019 una persona adulta viviendo en EE. UU. consume entre 40 y 60,000 micropartículas plásticas anualmente (Cox et al., 2019). Hay evidencia de MP 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, Mason, & Wattenberg, 2018).

Además, las micropartículas plásticas pueden adherirse a los alimentos durante el empaquetamiento y estar presentes en productos como miel, sal de mesa, azúcar, leche y pescado. Como ya se mencionó, los MP forman parte de la contaminación atmosférica, se encuentran en el polvo de los hogares, donde son inhalados por los seres humanos (Gasperi et al., 2018) y llegan 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 MP 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. Falta mucha información para determinar su toxicidad y riesgos para la salud humana; por ejemplo, los niveles de exposición a los MP, la cantidad de microplásticos que ingresan al cuerpo y la cantidad de los mismos 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 MP deben enfocarse en dos aspectos: control de las fuentes y remediación. El primero se refiere a la disminución de la cantidad de MP generados, lo que limita la producción de MP primarios y de residuos plásticos que pueden dar lugar a MP secundarios, principalmente a través de legislaciones y de programas de concientización; mientras que el segundo busca eliminar los MP ya existentes en el ambiente; en particular, en el océano y en los efluentes de aguas residuales.

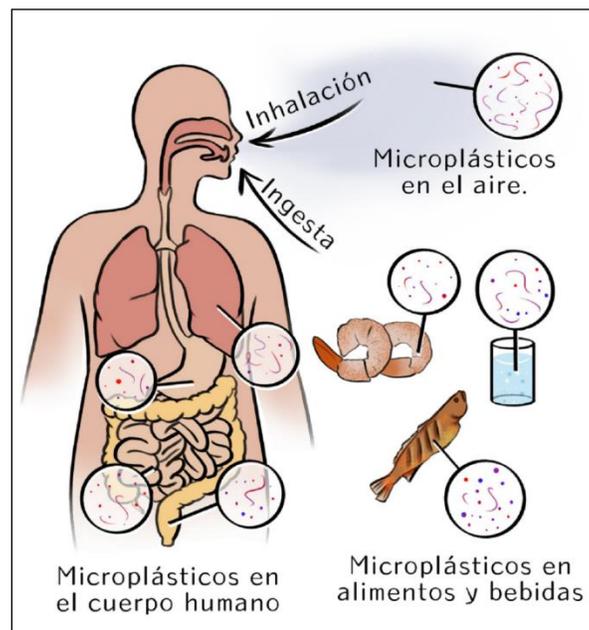


Figura 5. Mecanismos comunes de ingreso de los microplásticos al cuerpo humano. Elaboración propia.

Otra estrategia es el desarrollo de materiales plásticos biobasados 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. 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 MP 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, Lindeque, Halsband, & Galloway, 2011). En este sentido, se ha creado el proyecto de fuga de plástico (PLP, en inglés). 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 MP 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 aquéllos 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 la educación y participación del público son indispensables para reducir la contaminación. Es necesario llegar a un consenso sobre el tamaño en el cual una partícula plástica se considera 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 éstos 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*. En D. He, & Y. Luo (Eds.), *Microplastics in Terrestrial Environments. The Handbook of Environmental Chemistry* (vol. 95, pp. 143-159). Springer, Cham.
- Bai, Z., Wang, N., & Wang, M. (2021). Effects of microplastics on marine copepods. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 217. doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112243
- Bhattacharya, P., Lin, S., Turner, J., & Ke, P. (2010). Physical adsorption of charged plastic nanoparticles affects algal photosynthesis. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(39), 16556-16561. doi: 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, 518-530. doi: 10.1007/s13280-021-01589-9

- Browne, M., Crump, P., Niven, S., 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. doi: 10.1021/es201811s
- Browne, M., Dissanayake, A., Galloway, T., Lowe, D., & Thompson, R. (2008). Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L.). *Environmental Science & Technology*, 42(13), 5026-5031. doi: 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. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.04.074
- Carpenter, E., Anderson, S., Harvey, G., Miklas, H., & Peck, B. (1972). Polystyrene spherules in coastal waters. *Science*, 178(4062), 749-750. doi: 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). doi: 10.1371/journal.pone.0032254
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 62(12), 2588-2597. doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.09.025
- Cox, K., Covernton, G., Davies, H., Dower, J., Juanes, F., & Dudas, S. (2019). Human consumption of microplastics. *Environmental Science & Technology*, 53(12), 7068-7074. doi: 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. doi: 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. doi: 10.1038/srep46687
- Ding, J., Zhang, S., Razanajatovo, R., 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. doi: 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. doi: 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. doi: 10.1016/j.envpol.2013.01.046
- Gasperi, J., Wright, S., Dris, R., Collard, F., Mandin, C., Guerrouache, M.,...Tassin, B. (2018). Microplastics in air: Are we breathing it in? *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 1, 1-5. doi: 10.1016/j.coesh.2017.10.002
- Geyer, R., Jambeck, J., & Law, K. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7). doi: 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. doi: 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. doi: 10.1021/acs.est.5b02431
- Hartmann, N. B., Hüffer, T., Thompson, R. C., Hasellöv, M., Verschoor, A., Daugaard, A. E.,... Wagner, M. (2019). Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris. *Environmental Science & Technology*, 53(3), 1039-1047. doi: 10.1021/acs.est.8b05297

- Hartmann, N., Rist, S., Bodin, J., Jensen, L., Schmidt, S., Mayer, P.,...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. doi: 10.1002/ieam.1904
- Hodson, M., Duffus-Hodson, C., Clark, A., Prendergast-Miller, M., & Thorpe, K. (2017). Plastic bag derived-microplastics as a vector for metal exposure in terrestrial invertebrates. *Environmental Science & Technology*, 51(8), 4714-4721. doi: 10.1021/acs.est.7b00635
- Horton, A., & Dixon, S. (2018). Microplastics: An introduction to environmental transport processes. *WIREs Water*, 5(2). doi: 10.1002/wat2.1268
- Huerta Lwanga, E., Gertsen, H., Gooren, H., Peters, P., Salánki, T., van der Ploeg, M.,...Geissen, V. (2016). Microplastics in the Terrestrial Ecosystem: Implications for *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta, Lumbricidae). *Environmental Science & Technology*, 50(5), 2685-2691. doi: 10.1021/acs.est.5b05478
- Jenner, L., Rotchell, J., Bennett, R., Cowen, M., Tentzeris, V., & Sadofsky, L. (2022). Detection of microplastics in human lung tissue using μ FTIR spectroscopy. *Science of The Total Environment*, 831, 154907. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154907
- Jeong, C., Kang, H., Lee, M., Kim, D., Han, J., Hwang, D.,...Lee, J. (2017). Adverse effects of microplastics and oxidative stress-induced MAPK/Nrf2 pathway-mediated defense mechanisms in the marine copepod *Paracyclopsina nana*. *Scientific Reports*, 7(1), 41323. doi: 10.1038/srep41323
- Kim, L., Cui, R., il Kwak, J., & An, Y. (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. doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.129715
- Koelmans, A., Bakir, A., Burton, G., & Janssen, C. (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. doi: 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* (vols. 610-611, pp. 635-640). doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.053
- Kole, P. J., Löhr, A., 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. doi: 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. doi: 10.1371/journal.pone.0194970
- Leslie, H., van Velzen, M., Brandsma, S., Vethaak, A., Garcia-Vallejo, J., & Lamoree, M. (2022). Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*, 163, 107199. doi: 10.1016/j.envint.2022.107199
- Liu, C., Li, J., Zhang, Y., Wang, L., Deng, J., Gao, Y.,...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. doi: 10.1016/j.envint.2019.04.024
- Massos, A., & Turner, A. (2017). Cadmium, lead and bromine in beached microplastics. *Environmental Pollution*, 227, 139-145. doi: 10.1016/j.envpol.2017.04.034
- Obbard, R. (2018). Microplastics in Polar Regions: The role of long range transport. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 1, 24–29. doi: 10.1016/j.coesh.2017.10.004

- O'Donovan, S., Mestre, N., Abel, S., Fonseca, T., Carteny, C., Cormier, B.,...Bebiano, M. (2018). Ecotoxicological effects of chemical contaminants adsorbed to microplastics in the clam *Scrobicularia plana*. *Frontiers in Marine Science*, 5. doi: 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). doi: 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. doi: 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. doi: 10.1021/acsomega.9b00222
- Razeghi, N., Hamidian, A., Wu, C., Zhang, Y., & Yang, M. (2021). Microplastic sampling techniques in freshwaters and sediments: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(6), 4225-4252. doi: 10.1007/s10311-021-01227-6
- Rillig, M., & Bonkowski, M. (2018). Microplastic and soil protists: A call for research. *Environmental Pollution*, 241, 1128-1131. doi: 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. En H. Takada, & H. Karapanagioti (Eds.), *Hazardous chemicals associated with plastics in the marine environment. The Handbook of Environmental Chemistry* (vol. 78). Springer, Cham. doi: 10.1007/698_2016_17
- Rodrigues, M., Gonçalves, A., Gonçalves, F., Nogueira, H., Marques, J., & Abrantes, N. (2018). Effectiveness of a methodology of microplastics isolation for environmental monitoring in freshwater systems. *Ecological Indicators*, 89, 488-495. doi: 10.1016/j.ecolind.2018.02.038
- Scheurer, M., & Bigalke, M. (2018). Microplastics in swiss floodplain soils. *Environmental Science & Technology*, 52(6), 3591-3598. doi: 10.1021/acs.est.7b06003
- Schwabl, P., Koppel, S., Königshofer, P., Bucsecs, T., Trauner, M., Reiberger, T., & Liebmann, B. (2019). Detection of various microplastics in human stool: A prospective case series. *Annals of Internal Medicine*, 171(7), 453-457. doi: https://doi.org/10.7326/m19-0618
- Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H., & 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. doi: 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. doi: 10.1016/j.envpol.2013.10.013
- Thompson, R., Olsen, Y., Mitchell, R., Davis, A., Rowland, S., John, A.,...Russell, A. (2004). Lost at Sea: where is all the plastic?. *Science*, 304(5672), 838-838. doi: 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. doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112111
- Velzeboer, I., Kwadijk, C., & Koelmans, A. (2014). Strong sorption of PCBs to nanoplastics, microplastics, carbon nanotubes, and fullerenes. *Environmental Science & Technology*, 48(9), 4869-4876. doi: 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. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.209

- Zalasiewicz, J., Waters, C., Ivar do Sul, J., Corcoran, P., Barnosky, A., Cearreta, A.,...Yonan, Y. (2016). The geological cycle of plastics and their use as a stratigraphic indicator of the Anthropocene. *Anthropocene*, 13, 4-17. doi: 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. doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103118
- Zhao, S., Zettler, E., Bos, R., Lin, P., Amaral-Zettler, L., & Mincer, T. (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. doi: 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. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144495



Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Usted es libre de Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato
Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material
La licenciente no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciente.

NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales.

CompartirIgual — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, debe distribuir su contribución bajo la misma licencia del original.