

# La problemática de los micro y nanoplásticos en las costas americanas del Océano Pacífico

## The issue of micro and nanoplastics on the American coasts of the Pacific Ocean

Valeria Susana Martínez González,\* Simón Guerrero Rivera,\*  
Guido Mora-Longa,\* Carolina Klagges Ormeño,\* Mabel Moreno Araneda,\*  
Mario Luis Miranda Montenegro,\*\* Martha Lucia Palacios Peñaranda,\*\*  
Adriana María Chaurra Arboleda,\*\*\* Sara Regina Purca Cuicapusa,<sup>◊</sup>  
José Robinson-Duggan,<sup>◊◊</sup> José Roberto Vega-Baudrit <sup>◊◊◊,†</sup>

**ABSTRACT:** This work addresses the micro and nanoplastics (MP and NP, respectively) on the American coasts of the Pacific Ocean from the perspective of the Micro & Nano Allpa Pacha Network. This network is made up of scientists from Chile, Perú, Costa Rica, Colombia, Ecuador, Panama, and Mexico, who, concerned about the impact on the environment and its repercussions on health, decided to establish international scientific collaborations for the geolocation, monitoring, and characterization of MP and NP present on the coasts of the Pacific Ocean in the American continent. It is expected to provide data based on harmonized scientific evidence, which will impact the teaching and planning of control and regulation measures for these pollutants in our countries. This work includes some aspects of polymers and plastics, definitions of MP's and NP's and their various impacts, the problem of taking samples, adequate characterization, among others. One of the conclusions determined that are many characteristics of NP's and MP's without investigating, such as interaction with other chemical products, the impact of morphology on bioavailability, formation of adhesions and their release during their contact with environmental compartments, the dependence of its composition with its behavior and destiny, among others. Likewise, it was determined that any contribution to mitigating the problem of these materials must include awareness, prevention, and reduction through a comprehensive approach to education and training and considering all actors in society responsible for the problem generated un-

Recibido: 20 de noviembre, 2021. Aceptado: 7 de noviembre, 2022. Publicado: 30 de noviembre, 2022.

\* Universidad SEK, (I3CBSEK), Santiago, Chile, Instituto de Investigación Interdisciplinar en Ciencias Biomédicas, Facultad de Ciencias de la Salud, Red Micro y Nano Allpa Pacha.

\*\* Universidad de Panamá, Panamá, Laboratorio de la Calidad del Agua y del Aire (LACAYA), Sistema Nacional de Investigación, Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, República de Panamá, Red Micro y Nano Allpa Pacha.

\*\*\* Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia, Grupo de Gestión y Desarrollo Ambiental Sostenible (GEADES), Red Micro y Nano Allpa Pacha.

<sup>◊</sup> Instituto del Mar del Perú (IMARPE), Callao-Perú, Red Micro y Nano Allpa Pacha.

<sup>◊◊</sup> Universidad de Panamá, Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Bioquímica, Sistema Nacional de Investigación (SNI), Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, República de Panamá, Red Micro y Nano Allpa Pacha.

<sup>◊◊◊</sup> Universidad Nacional Heredia, Costa Rica, Laboratorio Nacional de Nanotecnología (LANOTEC), Centro de Alta Tecnología (CENAT), San José, Costa Rica, Laboratorio de Polímeros (POLIUNA), Escuela de Química, Red Micro y Nano Allpa Pacha.

<sup>†</sup> Autor de correspondencia: jvegab@gmail.com



der a scientific evidence approach. Finally, it was determined that the issue is still in its initial phase, and the information is repetitive and self-referenced.

**KEYWORDS:** microplastic, nanoplastic, plastics, regulations, Micro & Nano Allpa Pacha Network.

**RESUMEN:** Este trabajo aborda la problemática representada por los micro y nanoplásticos (MP y NP, respectivamente) en las costas americanas del Océano Pacífico, desde la perspectiva de la Red Micro y Nano Allpa Pacha. Esta red está conformada por científicos de Chile, Perú, Costa Rica, Colombia, Ecuador, Panamá y México, quienes, preocupados por el impacto en el ambiente y su repercusión en la salud, decidieron establecer colaboraciones científicas internacionales para la geolocalización, monitoreo y caracterización de MP y NP presentes en las costas del Océano Pacífico en el continente americano. Se espera aportar datos basados en evidencias científicas y armonizados, que impacten en la enseñanza y en la planificación de medidas de control y regulación de estos contaminantes en nuestros países. En este trabajo se incluyen algunos aspectos de polímeros y plásticos, definiciones de MP's y NP's, y sus diversos impactos, la problemática de la toma de muestras, caracterización adecuada, entre otros. Unas de las conclusiones permitieron determinar que hay muchas características de los NP's y MP's sin investigar como la interacción con otros productos químicos, el impacto de la morfología en la biodisponibilidad, la formación de adherencias y liberación de las mismas durante su contacto con los compartimentos ambientales, la dependencia de su composición con su comportamiento y destino, entre otras. Asimismo, se determinó que todo aporte a la mitigación del problema de estos materiales debe incluir la concientización, la prevención y la reducción, mediante un enfoque integral de educación y capacitación, y considerando todos los actores de la sociedad, responsables de la problemática generada, bajo un enfoque de evidencia científica. Finalmente, se determinó que el tema aún está en su fase inicial, y la información es reiterativa y auto referenciada.

**PALABRAS CLAVE:** microplástico, nanoplástico, plásticos, regulaciones, Red Micro y Nano Allpa Pacha.

## Introducción

Plástico es el término utilizado para describir un grupo de materiales sintéticos o semisintéticos utilizados en una amplia y creciente gama de aplicaciones. Hacia donde se mire, se puede encontrar plástico: desde la ropa, en las casas, en los autos, en los juguetes, hasta en las computadoras y los teléfonos. Forman parte de muchos de los suministros médicos que se necesitan para salvar vidas o tratar enfermedades. No se ve la presente pandemia del COVID 19, sin enfrentarla con la ayuda del plástico. Estos materiales han ayudado a hacer la vida de los seres humanos más fácil, segura y agradable, pero claramente no lo hemos gestionado adecuadamente.

El término “plástico” proviene de la palabra griega *plastikos*, que quiere decir, apto para moldear. Este término hace referencia a la plasticidad de dichos materiales, lo cual, durante la fabricación, permite moldearlo, prensarlo y darle formas diversas. Además, admite la adición de otras sustancias proporcionándole, algunas, colores diversos, y, otras, facilitando la modificación de sus propiedades fisicoquímicas. Esta misma plasticidad nos permite emplearlos en un sinnúmero de aplicaciones tales como la creación de películas, fibras, placas, tubos, botellas, cajas, bolsas, piezas de alta precisión, por mencionar algunas. Estas características hacen posible a los plásticos estar presentes en prácticamente todos los productos que se utilizan hoy en día (Vega-Baudrit, 2021).

Muchas de las materias primas empleadas en la producción de plásticos son productos derivados de la refinación del petróleo crudo. Una de las principales características de estos materiales es que no se degradan con facilidad en un tiempo que puede ser de varios cientos de años, dependiendo del tipo de material. Los plásticos fueron creados para tener una alta durabilidad, por lo cual, la necesidad de desechar un recurso tan valioso está ligado a la mala gestión, evidenciando la falta de educación en la sociedad respecto al proceso de su descarte (Vega-Baudrit, 2021). Entonces, estamos usando un material particularmente resistente y durable en productos de un solo uso sin una gestión responsable después de prescindir de ellos.

Los primeros plásticos fueron sintetizados en los años 1950s, reemplazando rápidamente otros materiales, como el vidrio y la madera. Su utilización se ha masificado de tal forma que solo en el año 2019, se llegaron a producir 368 millones de toneladas de plástico nuevo (Sobhani *et al.*, 2020). Bajo la forma de vida actual, gran parte de estos materiales será descartado en el ambiente sin ningún tipo de tratamiento, generando, en última instancia, grandes parches de material flotante en nuestros océanos, y montañas de desechos en nuestras comunidades. También se debe considerar que una buena contribución de este tipo de desechos proviene del crecimiento portuario y del comercio internacional. La falta de una disposición y gestión adecuada de estos materiales y su interacción con el ambiente (fuerzas mecánicas, biodegradación, reacciones fotoquímicas, entre otras) inducen la particularización de estos en trozos cada vez más pequeños, generando micro (MP) y nano plásticos (NP) (Vega-Baudrit, 2021).

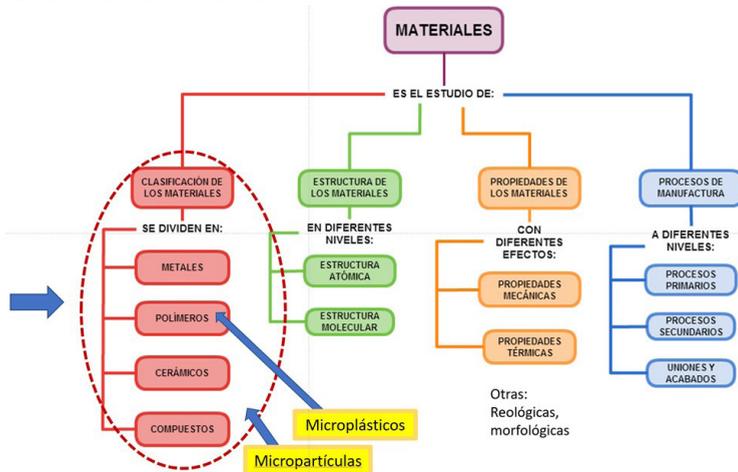
La Red Micro y Nano Allpa Pacha está conformada por investigadores de diferentes países de América, a quienes nos une la preocupación por el impacto de la contaminación por MP y NP en el ambiente de las costas del Océano Pacífico. Este documento ha sido escrito en un lenguaje sencillo con el fin de que sirva como una herramienta de información confiable para personas de diferentes disciplinas y para concientizar al público en general de las consecuencias del mal uso de materiales plásticos y de su mala disposición. Es razonable pensar que la crisis ambiental causada por los plásticos solo podrá ser manejada a través de la difusión de la información, la educación y el trabajo colaborativo, este documento es el inicio de esta estrategia.

## Materiales y polímeros

La palabra material adquiere diferentes significados según el contexto en el que se encuentre. En química, cualquier sustancia o mezcla de sustancias de lo que están hechos los objetos de estudio es un material. Como se observa en la figura 1, un material se puede estudiar desde distintos contextos: clasificación, estructura, propiedades y manufactura. Para efectos de este documento, se hará a través de la clasificación de los materiales como metales, polímeros, cerámicas y compuestos o composites.

Los materiales poliméricos son compuestos químicos que están conformados por muchas piezas o unidades iguales o distintas que se repiten denominadas monómeros. Muchas unidades monoméricas entrelazadas químicamente constituyen los polímeros. Los monómeros de los polímeros sintéticos provienen en su mayoría de la refinería del petróleo (por ejemplo, el etileno deriva en polietileno, el poliestireno del estireno, y así sucesivamente). Los polímeros se clasifican de múltiples maneras. Según su origen, como naturales y sintéticos, y poseen múltiples aplicaciones en todos los campos. Como ejemplo de los polímeros sintéticos tenemos los policarbonatos PC, polietilentereftalato PET y al teflón PTFE, entre otros. Mientras que de origen natural tenemos la celulosa, la quitina, los dextranos y los almidones, entre otros (Vega-Baudrit, 2021).

FIGURA 1. Clasificación de los materiales.



Fuente: Vega-Baudrit (2021).

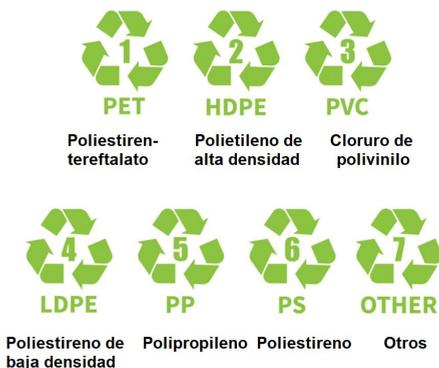
Por otro lado, los polímeros también se pueden clasificar por su estabilidad frente a la temperatura. Cuando estos se funden por un calentamiento del material, se les denomina termoplásticos, si no se funden y más bien se degradan, se denominan termoestables o termorrígidos. Una tercera clasificación incluye aquellos polímeros (hules) con una elevada elasticidad frente a un esfuerzo aplicado. Si se parte de la definición estricta de plástico, los MP y los NP solo estarían conformados por el primer grupo. Sin embargo, el término incluye todos los polímeros, lo cual es erróneo. Las micro o nanopartículas se originan de cualquier material que se pulverice por cualquier acción. Por cuestión “histórica”, los MP y los NP originados de cualquier fuente polimérica están mal designados de esa forma, pues por definición no se podría contemplar ni a las resinas termorrígidas ni a los hules (Vega-Baudrit, 2021).

## Plásticos

Dentro del contexto de los polímeros, los plásticos merecen una especial atención. Los plásticos son polímeros sintéticos obtenidos mediante reacciones de polimerización —usualmente— a partir de derivados de petróleo. Están presentes en todas partes, en todo tipo de aplicaciones. El plástico contribuye a mejorar la calidad de vida de la sociedad actual con sus múltiples aplicaciones, casi siempre tienen un bajo costo, son muy atractivos debido a las diversas formas texturas y colores que puede tener, y definitivamente llegaron para quedarse. Esto último es el origen del problema, pues fueron hechos para perdurar, pero se desechan como si fueran fácilmente reintegrables a la naturaleza, en gran medida por desconocimiento de la población. (Vega-Baudrit, 2021).

Los plásticos se clasifican, desde 1970, mediante el Triángulo de Moebius. Esta clasificación fue creada por Gary Anderson en la Universidad de California de Estados Unidos. Ayuda a comprender el origen de los productos y envases; asimismo, indica el tipo de material del que están hechos, informa el centro de acopio para depositarlos tras su uso, y si estos son o no reciclables (figura 2). Según la clasificación del Triángulo de Moebius los plásticos con número 1 y 2 son reciclables, el 5 y el 6 con posibilidades de reciclarlos, y, el 3, el 6 y el 7 son difícilmente reciclables.

FIGURA 2. Clasificación de los plásticos y el Triángulo de Moebius.



Fuente: Vega-Baudrit (2021).

## Microplásticos (MP) y nanoplásticos (NP)

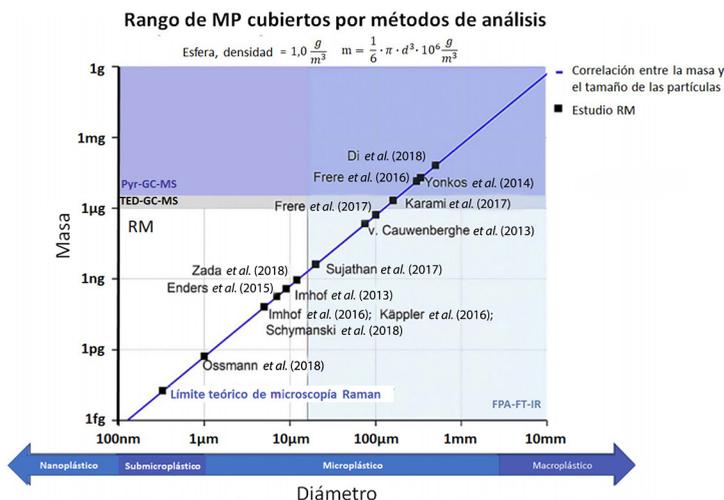
Los MP son pequeños trozos de plástico que tienen dimensiones que oscilan entre 5 mm y 1  $\mu\text{m}$ , definición que depende de la fuente de información. Por ejemplo, en la figura 3 se observa que la clasificación de microplásticos se sitúa entre 1  $\mu\text{m}$  y 5 mm, se incluyen, además, los macropelásticos con más de

5 mm, los submicroplásticos entre 100 nm y 1 µm y menos de 100 nm, y a los nanoplasticos NP (Vega-Baudrit, 2021).

Picó y Barceló (2019) muestran otras clasificaciones mencionadas en las distintas fuentes de información, como nano, micro, meso y macroplásticos (figura 4). Es evidente que la clasificación, en función del tamaño de la partícula, es un tema que aún causa polémica. Por caso, la Comisión de la Unión Europea clasifica los NP como partículas con tamaños entre 1 a 100 nm y en Estados Unidos se considera que están entre 5 mm y 1 nm (GESAMP, 2015).

Los MP y los NP se encuentran en todos los ambientes que se han estudiado (Shahul Hamid *et al.*, 2018), incluyendo el agua dulce (Huang *et al.*, 2021, Rech *et al.*, 2014), el mar (Gennip *et al.*, 2019; Isobe *et al.* 2019; Lavers y Bond 2017; Cózar *et al.* 2014; Eriksen *et al.* 2014; Hinojosa y Thiel 2009), el suelo (Huang *et al.* 2021; Corradini *et al.* 2019), el aire (Croxatto Vega, Gross y Birkved 2021; Cornejo-D’Ottone *et al.* 2020), en animales (Boyero *et al.*, 2020; Watts *et al.*, 2015), en plantas (Kalčíková, 2020; Mohan, Bi, He y Chen, 2020; Rillig *et al.*, 2019), a través de distintos niveles de la cadena trófica (Chagnon *et al.*, 2018; Shahul Hamid *et al.*, 2018; Thiel *et al.*, 2018) y en nuestra dieta (Senathirajah *et al.*, 2021; Cox *et al.*, 2019; Smith *et al.*, 2018). Todavía no se sabe con certeza los efectos que estos MP pueden tener para la vida humana o para los ecosistemas, respuestas que la comunidad científica hoy está buscando.

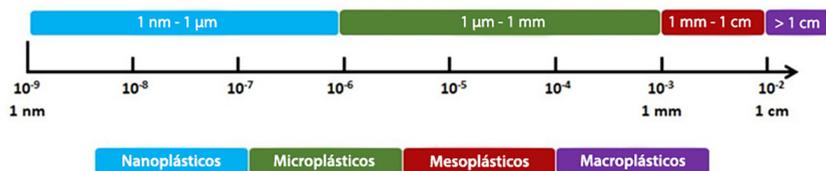
FIGURA 3. Clasificación de los plásticos por su tamaño y métodos de análisis según la literatura.



Los MP y NP se pueden clasificar bajo diferentes características, según su tamaño, como ya se discutió (figura 4), su forma (esfera, pellets, fragmentos, etc.) y la función u origen para lo cual fueron fabricados. Dependiendo de su origen, los microplásticos se clasifican como primarios y secundarios. El pri-

mario o intencional es aquel que se produce con un propósito, en las dimensiones en la escala ya mencionada. Se cuenta su uso en la industria de la cosmética, en los productos de limpieza, y como *pellets* para la producción de artículos plásticos (Vega-Baudrit, 2021).

FIGURA 4. Clasificación de los plásticos y métodos de análisis según su tamaño.



Fuente: Hartmann *et al.* (2016).

El MP secundario o accidental proviene del deterioro continuo de piezas mayores —que están mal gestionadas en el medio ambiente—, pasando de ser una contaminación visible a una en la que es necesario emplear técnicas especiales para su detección. Actualmente se están usando técnicas tales como la cromatografía de gases-masa acoplada a desorción térmica (TED-GC-MS), termogravimetría (TGA) unido al análisis de gases emanados (EGA) o calorimetría diferencial de barrido (DSC), la cromatografía de gases-masa acoplada a pirólisis (Pyr-GC-MS), espectroscopía Raman acoplada a microscopio ( $\mu$ Raman) y espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier acoplada a matriz de plano focal (FPA-FT-IR). Se incluyen también los desechos de las fibras de poliésteres, nylon, acrílicos y otros textiles presentes en la ropa. Asimismo, las partículas de neumáticos, redes de pesca, por mencionar algunos.

Los factores de deterioro de los materiales plásticos que promueven su fragmentación incluyen la luz ultravioleta, la abrasión física por el oleaje, el movimiento del agua en los ríos o el viento, así como la temperatura (Vega-Baudrit, 2021). Adicionalmente a las clasificaciones ya mencionadas, los MP pueden ser clasificados de acuerdo con su morfología en cinco categorías: esferas, fibras, películas, fragmentos y espumas (figura 4).

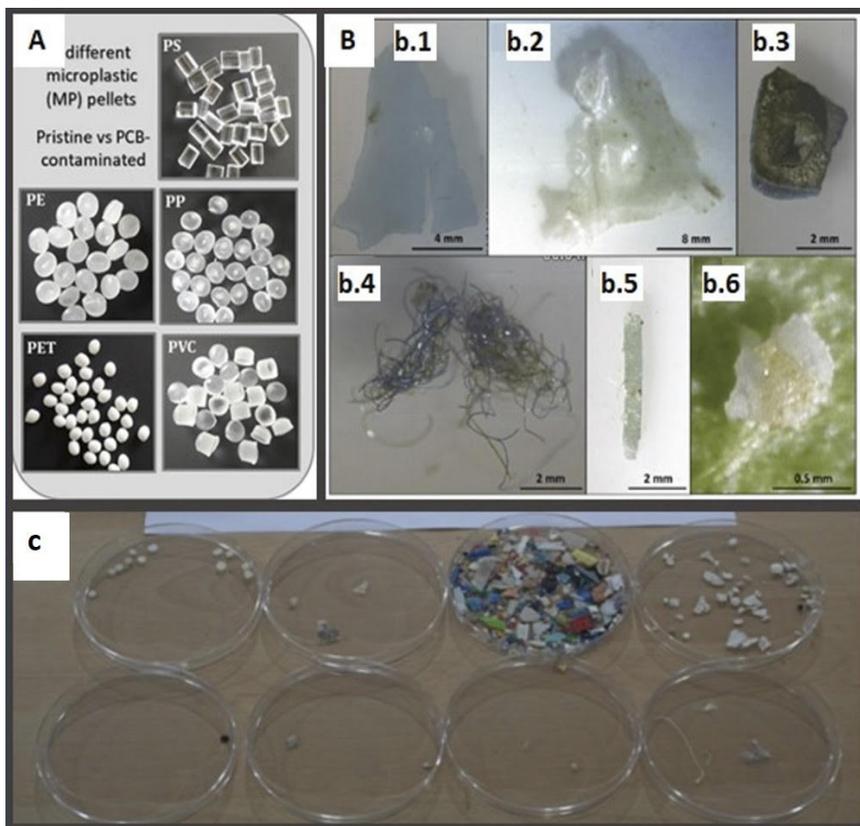
## Morfología de los MP y NP, y su efecto en la biodisponibilidad

Si bien los fragmentos y las fibras son las formas de MP y NP más ampliamente distribuidas en diferentes matrices (agua, sedimentos y organismos), las esferas son la forma más usada en los bioensayos debido a que es la más comercializada, sin embargo, considerar el uso de fragmentos o fibras en los bioensayos se aproxima más a la exposición real de los organismos a los MP (Collard *et al.*, 2015).

Por otro lado, la interacción de estos materiales con los cuerpos de agua, afecta la morfología de la superficie de los MP y NP, lo cual conlleva a cambios en la flotabilidad y en la interacción con componentes químicos coexistentes

(por ejemplo: metales pesados, contaminantes orgánicos persistentes, compuestos hidrofóbicos y aditivos) en el medio; por tanto, las transformaciones anteriores pueden también alterar su biodisponibilidad y toxicidad. En algunos casos, estas transformaciones los convierte en vectores que, una vez ingeridos por los organismos, pueden liberar su carga, como en el caso del ecosistema de los manglares, donde se ha observado la prevalencia de la contaminación por microplásticos en el tracto digestivo de peces (Garcés-Ordóñez *et al.*, 2020). A pesar de que algunos ensayos han mostrado que la ingestión de MP por algunos organismos acuáticos depende de la morfología (figura 5), todavía queda mucho camino por recorrer para poder establecer tendencias claras en la dependencia de la biodisponibilidad con la morfología de estos materiales (Karami, 2017).

**FIGURA 5.** Tipos de MP: (A) en *pellet*; (B) fotografías de fragmentos de MP: (b.1) fragmento, (b.2) film, (b.3) espuma, (b.4) fibra, (b.5) línea, y, (b.6) *pellet*; (C) Muestra de microplásticos encontrados en la playa Costa Azul, en Callao-Perú.

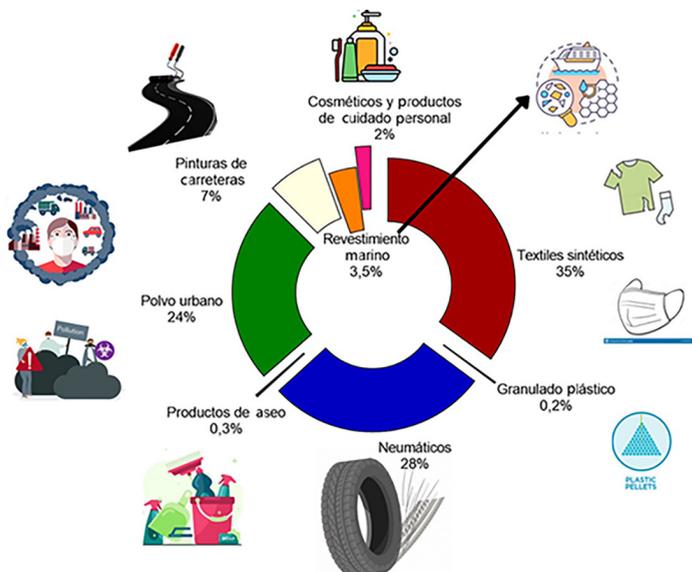


Fuente: (A): Adaptado de Rosato *et al.* (2020); (B): Adaptado de Fee *et al.* (2014), y, (C): Adaptado de Purca y Henostroza (2017).

## Fuentes de MP y NP, y sus efectos en el ambiente

La mayoría de los MP y NP en los océanos provienen de los textiles sintéticos, neumáticos y el polvo de las ciudades (figura 6); y las actividades humanas que más generan MP y NP son la pesca, la acuicultura, el transporte marino y el turismo (Bermúdez-Guzmán *et al.*, 2020). Estudios científicos han demostrado que los MP son capaces de acarrear contaminantes y organismos patógenos en su superficie, llevándolos a lugares donde nunca antes han estado, afectando ecosistemas de muchas maneras. Se ha reportado que la interacción de materiales plásticos con la materia orgánica disuelta (MOD) en aguas cálidas puede propiciar la liberación de metabolitos secundarios que, al ser adsorbidos por la MOD, se movilizarán a lo largo de la columna de agua en los ambientes acuáticos (Miranda *et al.*, 2016).

FIGURA 6. Fuentes de contaminantes MP marinos. Datos a partir de UICN, 2017.



Fuente: Boucher y Friot (2017).

Sin duda el estudio de los MP y NP es un campo muy activo. En las últimas décadas ha experimentado un aumento en el interés de la comunidad científica actual y debe ser abordado desde el análisis interdisciplinario (Oceans, 2020). Reportes recientes indican que los MP y NP están siendo ingeridos por diversas especies, que confunden estos materiales con alimentos. Esto los expone a los productos químicos que los componen, o por los patógenos acarreados por estas pequeñas piezas de plástico (Ory, Gallardo *et al.*, 2018; Pérez-Venegas *et al.*, 2018; Mizraji *et al.*, 2017; Ory, Chagnon *et al.*, 2018).

A lo largo de la vertiente pacífica del continente americano se ha reportado la ingesta de estos contaminantes emergentes en varias especies acuáticas. El primer registro que aborda la presencia de MP en peces de áreas protegidas de Guatemala indicó haber encontrado MP en el tracto digestivo de 624 individuos de 16 especies de peces. Se reportó la presencia de 644 MP en más del 45% de los individuos de 15 especies. Estas partículas se distribuyeron en un rango de ingestión promedio entre 1 y 4 MP por organismo. Las formas dominantes de MP ingeridas fueron las fibras (82%) seguidas por fragmentos (12%) y láminas (6%) (Mazariegos Ortiz *et al.*, 2021). De acuerdo con el reporte, esta ingesta estuvo condicionada a los hábitos alimenticios y la especie estudiada.

En Chile se han encontrado MP en diversas especies animales de vertebrados, incluyendo peces (Ory, Gallardo *et al.*, 2018; Chagnon *et al.*, 2018; Pozo *et al.*, 2019), focas (Pérez-Venegas *et al.* 2018), anfibios (Boyero *et al.*, 2020), invertebrados como cangrejos (Watts *et al.*, 2016), moluscos bivalvos y crustáceos (Ory *et al.*, 2017), entre otros.

Aunque existen algunos estudios toxicológicos que establecen el daño que los MP causan en los ecosistemas, la controversia acerca del destino y los impactos de los MP en los seres vivos ha aumentado debido a la ausencia de bioensayos de laboratorio estandarizados. La diversidad en las propiedades químicas (tipo de polímero, aditivos, etc.) y físicas (tamaño, forma, flotabilidad) de los MP hace necesario modificar los protocolos tradicionales de los bioensayos usados para evaluar la toxicidad de compuestos con características individuales y definidas antes de emplearlos para el monitoreo de la toxicidad de los MP (Enyoh *et al.*, 2020). Asimismo, se debe considerar el tamaño, hábito alimenticio, ciclo de vida, y comportamiento en general de los distintos organismos vivos involucrados en estos estudios. Es importante indicar que, hasta el momento, no se han desarrollado protocolos adecuados para el estudio de los MP.

Por lo anterior, se hace necesario mejorar la calidad y armonizar internacionalmente los métodos utilizados para evaluar la exposición, el destino y los efectos de los MP en la naturaleza y los seres humanos. En la tabla 1 se presentan algunos ejemplos de estudios de MP en la biota marina en algunos de los países de la costa americana del pacífico.

En Perú, se han encontrado microplásticos en 30 individuos de peces (Ory, Chagnon *et al.*, 2018; Ory, Gallardo *et al.*, 2018), en caballas y calamares entre 1 a 7.4 ítems promedio por individuo (Fernández-Ojeda *et al.*, 2021; Gong *et al.*, 2021). En estos estudios, los filamentos fueron los tipos de MP más abundantes (De-la-Torre, Mendoza Castilla y Carhuapoma, 2019; Fernández-Ojeda *et al.*, 2021; Gong *et al.*, 2021). En Chile, se han encontrado MP en varias especies estudiadas, entre ellas diversos tipos de peces (Ory, Chagnon *et al.* 2018; Ory, Gallardo *et al.*, 2018; Ory *et al.*, 2017; Mizraji *et al.*, 2017), y focas (Pérez-Venegas *et al.*, 2018).

**TABLA 1.** Estudios de MP en biota de algunos países de la costa del Pacífico americano.

Ecosistema	Especies hidrobiológicas	Tipo microplásticos	Cantidad / micro	Autores
Marino intermareal	Peces herbívoros y omnívoros	Filamentos	Las microfibras son los MP más abundantes	Mizraji <i>et al.</i> (2017).
Marino vertebrado	Peces planctívoros	Fragmentos y filamentos degradados, entre 1.1 a 4.9 mm	2.1% de los peces estudiados tenía MP en el tracto digestivo	Ory <i>et al.</i> (2018); Ory, Gallardo <i>et al.</i> (2018); Ory, Chagnon, <i>et al.</i> (2018).
Marino vertebrado	Focas	Fibras	2.7 a 13.35 ítems/g <sup>-1</sup>	Pérez-Venegas <i>et al.</i> (2018).
Intermareales Invertebrados	Concha de abanico	Filamentos	2.25 ± 0.54 ítems/individuo	De la Torre <i>et al.</i> (2019).
Pelágico oceánico	Caballa	Fragmento de plástico duro	Promedio (0.03 /30 indiv.)	Ory <i>et al.</i> (2018); Ory, Gallardo <i>et al.</i> (2018); Ory, Chagnon <i>et al.</i> (2018).
Pelágico oceánico	Pota (calamar gigante)	Filamentos y fragmentos de plásticos duros	4-7.4 ítems/individuo	Gong <i>et al.</i> (2021).
Pelágico costero	Machete	Filamentos	9 ítems/1830 estómagos	Fernández-Ojeda <i>et al.</i> (2021).
Manglar	Notarius bonillai y Megalops atlanticus	Filamento, film, foam, fragmento		Garcés-Ordoñez <i>et al.</i> (2020).

Fuente: Vega-Baudrit (2021).

## Toma de muestra y caracterización de MP y NP

Considerando que las muestras de MP y NP pueden ser diversas en cuanto a forma, tamaño y su constitución; del mismo modo, el estudio detallado de los MP aún es limitado debido a la falta de metodologías normalizadas y científicamente validadas para su muestreo, su mantenimiento, y el análisis adecuado de datos (aspectos cualitativos y cuantitativos). Los equipos que emplean técnicas tales como la Pyr-GC-MS, TED-GC-MS, FPA-FT-IR,  $\mu$ Raman, TGA-EGA, y el DSC, son escasos y se encuentran solo a la mano de un grupo reducido de centros de investigación (Vega-Baudrit, 2021).

Una oportunidad de mejorar el abordaje de este tema es que actualmente no se ha conformado un comité internacional ISO para la creación de normas estándar que sea específico para el muestreo, análisis y cuantificación de los MP y NP en el ambiente. Sin embargo, hay unas normas de textiles (del Comité ISO/TC 38) y plásticos (del Comité ISO/TC61) de la ISO (International Organization for Standardization) en proceso de desarrollo, y que podrían ser empleadas como base, para la creación de normas para MP y NP. En la tabla 2 se

muestran algunas normas del Comité ISO/TC 38 en proceso de estudio e implementación (Vega-Baudrit, 2021). Del mismo modo, el comité técnico ISO/TC61/SC14, referido a procesos de normalización en el campo de los plásticos relacionados con aspectos medioambientales y de sostenibilidad, ha emitido la norma: ISO/TR 21960:2020, la cual se refiere a la literatura científica actual sobre macroplásticos y MP en el medio ambiente y la biota. Este ofrece una descripción general de los métodos de prueba, incluido el muestreo de diversas matrices ambientales, la preparación y el análisis de muestras. Se describen métodos de prueba químicos y físicos para la identificación y cuantificación de plásticos; y recomienda pasos necesarios para la estandarización de métodos que conlleven a procedimientos armonizados para el muestreo, preparación de muestras y análisis (Vega-Baudrit, 2021).

**TABLA 2.** Normas del Comité ISO/TC 38 en proceso de estudio e implementación en los países miembro de la ISO que así lo requieran.

Norma	Tema en proceso
ISO/CD 4484-1	Microplastics from textile sources — Part 1: Determination of fibre loss from fabrics during washing.
ISO/DIS 4484-2	Microplastics from textile sources — Part 2: Qualitative and quantitative evaluation of microplastics.
ISO/CD 4484-3	Microplastics from textile sources — Part 3: Measurement of collected material mass released from textile end products by domestic washing method.
ISO/CD 24187.2	Principles for the analysis of plastic and microplastic present in the environment.
ISO/AWI 5667-27	Water quality — Sampling — Part 27: Sampling for microplastic particles and fibres in water.

**En español:**

- Microplásticos de fuente textil — Parte 1: Determinación de la pérdida de fibra de los tejidos durante el lavado.
  - Microplásticos de fuente textil — Parte 2: Evaluación cualitativa y cuantitativa de microplásticos.
  - Microplásticos de fuentes textiles — Parte 3: Medición de la masa de material recogida liberada de los productos textiles finales mediante el método de lavado doméstico.
  - Principios para el análisis de plástico y microplástico presente en el medio ambiente.
  - Calidad del agua — Muestreo — Parte 27: Muestreo de partículas microplásticas y fibras en el agua.
- Fuente: Vega-Baudrit (2021).

El documento incluye métodos de muestreo en general para agua, suelos, aire y biota; consideraciones estadísticas, preparación de las muestras, análisis mediante espectroscopía, térmicos y métodos térmicos de extracción,  $\mu$ ATR-FTIR,  $\mu$ Raman, ATR-FTIR, Raman, TED-GC-MS, TGA-EGA, DSC, Py-GC-MS; define a los MP como un sólido plástico entre 1  $\mu$ m - 1 mm (1000  $\mu$ m) y a los NP como un sólido plástico menor a 1  $\mu$ m. Desafortunadamente la profundidad con la cual se trabaja cada temática es insuficiente para tener una metodología certera basada en evidencia científica. Sin embargo, es una

guía ante tanto vacío existente de información adecuada (Vega-Baudrit, 2021).

En Ecuador, en el Departamento de Ciencias y Aplicaciones Nucleares, del Organismo Internacional de Energía Atómica OEIA, han utilizado técnicas nucleares e isotópicas para establecer con precisión el rumbo, el emplazamiento y las repercusiones de las partículas de plástico, y sus derivados, mediante el uso de radiotrazadores, como el carbono-14. Encontraron que sustancias contaminantes —como los compuestos orgánicos persistentes COPs— pueden adherirse a los microplásticos presentes en el ambiente y, eventualmente, liberarse dentro de los organismos marinos que han ingerido MP potenciando el riesgo ambiental de estas sustancias (OEIA, 2020). También han utilizado radiotrazadores para estudiar el desplazamiento y la ubicación de los microplásticos dentro de los animales y establecer la vía de ingesta: bien sea mediante el sistema digestivo o mediante las branquias, dependiendo del organismo. También intentan averiguar si los microplásticos son expulsados o si, por el contrario, obstruyen los órganos: cuando estas partículas se acumulan en el intestino, algunos organismos sienten que están saciados aun cuando no han ingerido suficientes nutrientes (OEIA, 2020).

## Alternativas para la reducción de MP y NP

El incremento acelerado de generación de residuos plásticos derivados del petróleo, el aumento en el precio de este recurso no renovable y la contaminación que representan estos plásticos al medio ambiente, demandan una gestión adecuada y nuevas alternativas como la sustitución de tales polímeros por bioplásticos.

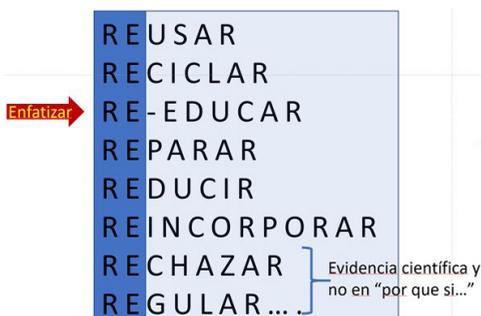
Existen varias alternativas respecto a la disminución de la generación de desechos plásticos. Desde la reutilización de los materiales plásticos hasta su rechazo. Asimismo, aplicar procesos de reciclaje es un proceso viable en la actualidad. La aplicación de técnicas como pirólisis permite la obtención de combustibles como fuente de energía. Los procesos de biorrefinería posibilitan la obtención de materiales plásticos a partir de biomasa, lo cual otorga a los procesos de carbono neutralidad (Vega-Baudrit, 2021; Amores *et al.*, 2022).

En la figura 7 se mencionan las “R” referentes al plástico. La que más debe enfatizarse es la de reeducar a la población respecto a las demás como: reciclar, reusar, reducir, reincorporar, regular e incluso hasta rechazar el uso de un producto como se indicó anteriormente. Es importante considerar que durante un proceso de rechazo o de regulación de un producto, este debe realizarse únicamente bajo evidencias científicas, y no por capricho (Vega-Baudrit, 2021). También, se debe considerar que algunas de estas “R” están fuertemente vinculadas con los hábitos de consumo de la sociedad, así como con su poder adquisitivo.

Una de las alternativas más populares es el reciclaje, incluido dentro del concepto de economía circular. Reciclar plásticos no es una tarea fácil. Im-

plica una campaña de concientización y educación de la población, la creación de centros de acopio, la recolección del material dependiendo de su origen: industriales o *scrap*, domiciliarios, agrícolas. La posterior clasificación y separación, la limpieza y eliminación de etiquetas, secado y trituración. Se debe considerar la presencia de materiales en multicapa que eleva el alto costo del reciclaje, posible contaminación que puede ser microbiológica. De igual forma, el procesamiento del plástico es complejo, hay pérdidas de propiedades del polímero, por lo que el número de procesos de reciclado es finito, pues el material se degrada (Vega-Baudrit, 2021a y b).

**FIGURA 7.** Las “R” referentes al uso del plástico.



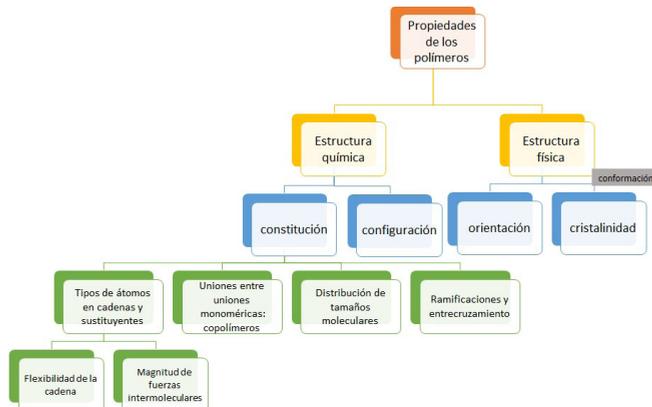
Fuente: Vega-Baudrit (2021).

En la figura 8 se observan algunas de las propiedades que deben tomarse en cuenta durante el procesamiento y reciclado de un material. Se debe considerar el estricto control de calidad, y las características de uso final. Uno de los temas más preocupantes es la garantía de suministro continuo de materia prima al proceso. El tema del almacenamiento pre y posterior al tratamiento y la posterior distribución del material. Por último, el traslado del costo del proceso al usuario final (Vega-Baudrit, 2021a y b). También se puede considerar que el reciclado de un material plástico, debido a su exposición ambiental, al proceso industrial o a su uso inadecuado en el almacenamiento de materiales tóxicos, podría ser alterado y ser una fuente de toxicidad para los seres humanos.

Otra alternativa viable, aunque algo costosa, es el empleo de polímeros biodegradables y compostables como el ácido poliláctico mostrado en la figura 9, a través de un proceso de hidrólisis o de fermentación de la biomasa residual.

El ácido poliláctico (PLA) es un polímero compostable industrialmente y biodegradable. Necesita estar en presencia de oxígeno, con agitación, temperatura adecuada, presencia de sales y de los microorganismos adecuados para que se dé la biodegradación. Asimismo, el proceso de síntesis no es fácil, requiere de materia prima muy pura, y es complejo. También se encuentra el poli-hidro-

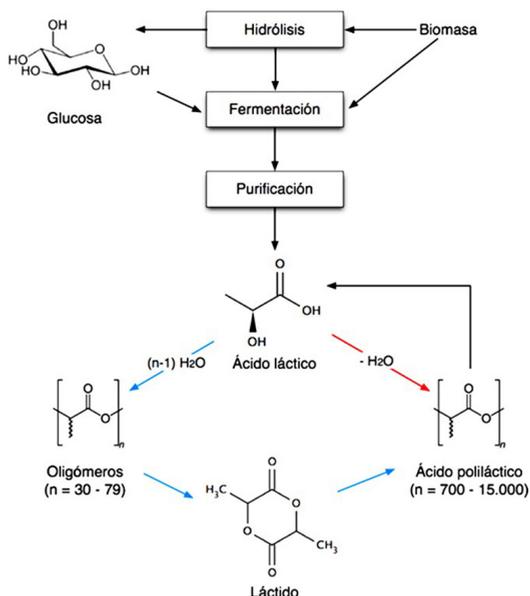
FIGURA 8. Parte de las propiedades de un polímero a ser consideradas en un procesamiento.



Fuente: Vega-Baudrit (2021).

xibutirato (PHB), un polímero perteneciente a la clase de los poliésteres, producido a raíz de la ingesta de glucosa, a partir de microorganismos como la *Ralstonia metallidurans* o el *Bacillus megaterium*, y es biodegradable. Fue aislado y caracterizado en 1925 por el microbiólogo francés Maurice Lemoigne (Villalobos-Vega *et al.*, 2021).

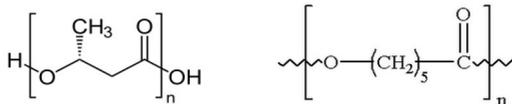
FIGURA 9. Proceso de obtención del ácido poliláctico (PLA) a partir de un proceso de hidrólisis y de fermentación de la biomasa residual.



Fuente: Villalobos-Vega *et al.* (2021).

También se tiene a la poli-caprolactona (PCL), un polímero de la familia de los poliésteres alifáticos, cuya unidad monomérica es la  $\epsilon$ -caprolactona (figura 10).

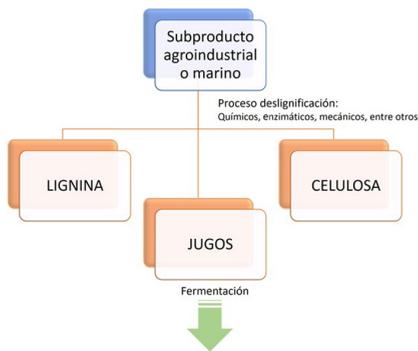
FIGURA 10. Estructura del PHB y del PCL, respectivamente.



Fuente: Villalobos-Vega et al. (2021).

Una tercera opción, es el aprovechamiento de los procesos de biorrefinería, dentro del contexto de la economía circular. La biorrefinería es como la refinería del petróleo, pero en lugar de emplear petróleo como material de partida, emplea biomasa para la obtención de materiales y energía, y todo lo positivo que implica para el medio ambiente. Como se observa en la figura 11, de diferentes tipos de procesos (químicos, enzimáticos, mecánicos, entre otros), es posible obtener productos de alto valor agregado como la lignina, la celulosa y el almidón, además de la fermentación de los jugos (dextranos), empleando métodos enzimáticos o microorganismos como el *Leuconostoc mesenteroides* (Menezes et al., 2021; Lecot et al., 2021; Mora-Sandí et al., 2021).

FIGURA 11. Obtención de materiales de alto valor agregado a partir de la biomasa.



Fuente: Vega-Baudrit (2021); Amores et al. (2022).

A partir de la celulosa, se puede obtener nanocelulosa, la cual posee un mayor valor agregado respecto a la celulosa, y se ha visto que mejora la producción de papel; se puede utilizar en la industria de las pinturas, cosméticos, medicina y farmacia, así como en la producción de material para embalaje en industria alimentaria como un nanomaterial de refuerzo. Se han observado también, importantes avances en la producción de láminas y pantallas para televisión, y se le considera el material que puede sustituir al uso de muchos tipos

de plástico. Se le estima un mercado de \$8.2 billones de dólares, con un 4.2% de crecimiento anual (Vega-Baudrit, 2021). Sin embargo, aún resulta muy costoso obtener nanocelulosa. Por esta razón, diferentes grupos de investigación buscan estrategias para optimizar la obtención de nanocelulosa involucrando diversas metodologías de innovación. Entre ellas destaca el uso de biofactorías con base en microorganismos, entre estos, el mayor productor corresponde a las bacterias del género *Gluconacetobacter*, destacándose la especie *Gluconacetobacter xylinus*, bacteria estrictamente aerobia, capaz de sintetizar celulosa como una membrana en la superficie de medios líquidos (Liu *et al.*, 2016).

Otro polímero natural muy estudiado es el almidón, puesto que es económico y muy abundante en el mundo vegetal. Su uso puede desempeñar un papel decisivo en la sustitución de plásticos sintéticos, permitiendo así disminuir el problema de acumulación de desechos plásticos (Shafqat *et al.*, 2021). La obtención de productos químicos y nuevos materiales a partir de fuentes renovables no es una idea nueva. Sin embargo, el reto está en desarrollar la biotecnología necesaria, para adaptar los productos a procesos y aplicaciones reales, que sean más competitivas y generen una verdadera revolución transformándose en una realidad en el mercado.

## MP y NP: ambiente y salud

### Afectación en el ambiente

Si bien los riesgos ecológicos y a la salud aún no son muy evidentes, se sospecha que en zonas marino-costeras, así como en sedimentos, los riesgos inherentes a la presencia y transformación de los MP pueden ser potenciados debido a las características fisicoquímicas del entorno (pH, radiación solar, ausencia de oxígeno y poblaciones de microorganismos). Reportes recientes sugieren la preferencia de algunas especies de microorganismos acuáticos en ambientes costeros para formar biolaminas y colonizar matrices particulares de microplásticos. Estas preferencias podrían desempeñar un rol en la diversidad de las comunidades acuáticas, al promover el crecimiento y dispersión de estos microorganismos en materiales con alta movilidad en estos entornos (Dudek *et al.*, 2020). Es importante evaluar todo el ciclo de vida del material plástico, desde su generación hasta el proceso de gestión del desecho, de tal forma que se permita una evaluación de la economía circular del material.

Los microplásticos han sido encontrados en las regiones polares remotas, específicamente en altas concentraciones en los núcleos de hielo marino (Peeken *et al.*, 2018). La mayoría de los que han sido detectados en los núcleos de hielo eran menores a 50  $\mu\text{m}$ , con un promedio del 67% de las partículas dentro del tamaño más pequeño detectable de 11  $\mu\text{m}$  (Peeken *et al.*, 2018). De igual manera, también han sido reportadas en la parte más profunda del océano, en los sedimentos de las fosas de las Marianas se han encontrado de 200 a 2,200 pedazos por litro, en donde la mayoría de las microfibras de plásticos tenían una medida de 1-3 mm de longitud en el agua del océano y de 0.1-

0.5 mm en longitud en el sedimento (Peng *et al.*, 2018). Se ha dado a conocer la presencia de microplásticos en regiones remotas, lo cual ha sido explicado por el ciclo del plástico (Horton y Dixon, 2018) en donde los microplásticos acumulados en los océanos son tan pequeños que se encuentran presentes en la evaporación que forman las nubes de la lluvia. Es por esto que esta lluvia contiene microplásticos y es posteriormente depositada en las regiones montañosas y en otras regiones remotas. Por consiguiente, los lagos y ríos transportan los microplásticos de regreso a los océanos, formando lo que se ha denominado el ciclo del plástico (Geyer *et al.*, 2017).

Por otra parte, la situación de los microplásticos en la costa del pacífico ecuatorial es especialmente preocupante por afectar una de las zonas de riqueza natural más importante como son las Islas Galápagos, según datos de Mingas por el Mar de Ecuador (Carrere, 2019), en el año se recogieron toneladas de basura de las playas del Ecuador, lo cual plantea un problema real de generación de residuos plásticos en la región continental, añadiendo que, en este país, la basura de los ríos, lagos, lagunas y esteros casi siempre termina en el mar, siendo esta basura portadora de residuos plásticos y por supuesto microplásticos (Álvarez y Bonilla 2020). Esta situación ambientalmente compleja se agrava, pues los plásticos residuales no recogidos en las playas del Ecuador continental, por efecto de la corriente de Humboldt, terminan en las costas de las islas Galápagos; lamentablemente, estas partículas de microplásticos que llegan a Galápagos probablemente no solo provienen del sur de Ecuador, desde la cuenca de Guayaquil, sino, además, de la costa norte de Perú, debiendo recalcar, que no hay partículas provenientes del Pacífico noroccidental ni del sudeste asiático (Álvarez y Bonilla, 2020). Por la riqueza natural de este archipiélago, la contaminación con microplásticos puede dañar especies especialmente sensibles y únicas de esta reserva natural.

### **Afectación en la salud humana**

Todo aporte a la mitigación de la problemática de los MP —basado en evidencia científica— y sus efectos en la salud humana se encuentra aún en estado primario. Las posibles alternativas o soluciones deben ir orientadas primero en la prevención, así como en mejorar la gestión de los desechos; todo enmarcado en procesos de educación, capacitación, cambios en los hábitos de consumo, y concientización de la población. Se debe trabajar fuertemente en normativas y armonización en nuestros países, de tal forma que se generen regulaciones en favor del ambiente, pero que incluyan aspectos que no vayan en detrimento ni de la economía ni los aspectos sociales de la región, tomando en cuenta todos los actores de la sociedad.

La contaminación del hábitat por plásticos de una especie puede inducir un desbordamiento zoonótico (desde el reservorio al hombre) y, con ello, una posible pandemia, resultando en un evento negativo para la salud pública (Chaber, 2018), un ejemplo es el nuevo coronavirus que causa COVID-19, tienen el potencial de causar pandemias globales. Los patógenos zoonóticos

pueden ser bacterianos, virales o parasitarios, o pueden involucrar agentes no convencionales y propagarse a los humanos a través del contacto directo o a través de alimentos, agua o el medio ambiente (World Health, 2020).

Por otro lado, existen muchas especies (como los pinnípedos y cetáceos, por ejemplo) que portan enfermedades derivadas de un ancestro terrestre, el morbillivirus, responsable del virus humano del sarampión, el virus del moquillo canino, el virus de la peste bovina y el virus de la peste de rumiantes pequeños. En 1988, frente a las costas del noroeste de Europa se produjo una mortandad masiva de más de 17 mil focas, atribuida a un morbillivirus, más tarde designado como virus del moquillo focino (Barrett *et al.*, 1995). Muchas especies de pinnípedos también están infectadas por el virus del herpes (Harder *et al.*, 1996), observándose una alta mortandad (> 16,000) de focas de puerto en 1985. Se ha especulado que aquellos animales marinos que habitan en zonas costeras contaminadas acumulan mayores niveles de contaminantes ambientales a través de la cadena alimentaria, volviéndose más susceptibles a las enfermedades.

Inicialmente, los microplásticos fueron considerados partículas inertes, pero en la actualidad son reconocidos como potencialmente dañinos para los organismos (Anbumani y Kakkar, 2018; Galloway, 2015), presentando un efecto dependiente de la exposición y la susceptibilidad. Los mismos pueden generar estrés oxidativo, citotoxicidad, translocación a otros tejidos, y, debido a su naturaleza persistente, limitan su remoción de los organismos, lo cual conlleva a una inflamación crónica con un elevado riesgo de cáncer. También han sido asociados con el incremento en la incidencia de las enfermedades inmunes y neurodegenerativas. Aunado a esto, los MP pueden liberar químicos, ya sea desde sus matrices o adsorbidos desde el ambiente, (Crawford y Quinn, 2017) así como fungir como vectores para microorganismos patógenos (Kirstein *et al.*, 2016), pesticidas e incluso metales pesados.

Investigadores han reportado que los microplásticos tienen la capacidad de generar estrés oxidativo, ya sea por medio de la liberación de especies oxidantes adsorbidas en su superficie o debido a las especies reactivas de oxígeno liberadas durante las respuestas inflamatorias (Kelly y Fussell, 2012; Valavanidis *et al.*, 2013). Se ha evidenciado la generación de estrés oxidativo en el pez cebra (*Danio rerio*) (Lu *et al.*, 2016) y en ratones (Deng *et al.*, 2017), posterior a su exposición a microplásticos.

Se considera que la citotoxicidad dada a conocer es el resultado de la toxicidad de la partícula, del estrés oxidativo y de la inflamación. La internalización celular de los microplásticos ha sido descrita previamente para el poliestireno en cultivos celulares, incluyendo macrófagos, eritrocitos y células epiteliales alveolares de ratas (Yacobi *et al.*, 2008). También se ha informado que, dentro de las células, los microplásticos no se encuentran asociados con la membrana, por lo cual se encuentran potencialmente en interacción con estructuras intracelulares (Geiser *et al.*, 2005). Estudios *in vitro* han demostrado citotoxicidad ocasionada por las partículas de plástico recolectadas del ambiente (Furukuma y

Fujii, 2016). Además, se ha reportado que la exposición a poliestireno es capaz de generar especies reactivas de oxígeno, así como estrés en el retículo endoplasmático en los macrófagos y cultivos celulares de células epiteliales humanas de pulmón, lo cual conlleva a autofagia como mecanismo de muerte celular (Chiu *et al.*, 2015). Por lo anteriormente mencionado, la citotoxicidad y el estrés oxidativo son mecanismos importantes como posibles explicaciones para la toxicidad presentada por los microplásticos y su capacidad de generar afectaciones a la salud de distintos organismos.

### Caso específico de los NP

En el asunto particular de los NP, debido a las preocupaciones ambientales, el destino y sus posibles efectos adversos, se han incrementado los estudios para evaluar el peligro potencial de la fragmentación de estos materiales en nanopartículas. La principal preocupación es que las nanopartículas pueden mostrar propiedades químicas y físicas marcadamente diferentes a las de su forma de nanomaterial. Hay un estudio sobre los riesgos potenciales de los nanoplásticos de poliéster para los humanos, que discute la influencia del tamaño de las partículas y la química de la superficie, con el fin de comprender los posibles riesgos de los nanoplásticos para los humanos y brindar recomendaciones para estudios futuros (Lehner *et al.*, 2019).

Otros estudios revelan que los productos de consumo de uso común, como las bolsas de nylon de grado alimenticio de un solo uso y los vasos para bebidas calientes revestidos con polietileno de baja densidad, liberan partículas de plástico de tamaño nanométrico cuando se exponen al agua. Se encontró que la cantidad de partículas liberadas en el agua caliente por el nylon de calidad alimentaria fue 7 veces mayor en comparación con los vasos de bebidas de un solo uso. Sobre la base de la densidad del número de partículas, las partículas liberadas en el agua desde un solo vaso de bebida caliente de 300 ml equivalen a una partícula por cada siete células en el cuerpo humano en un rango de tamaño disponible para la absorción celular. Este estudio no evalúa efectos adversos sobre la salud humana (Zangmeister *et al.*, 2022).

Del mismo modo, soluciones para mejorar la capa asfáltica empleando plástico reciclado, ya están siendo estudiadas por su posible efecto en la generación de NP en el ambiente (Veropalumbo *et al.*, 2023), aunque no indican estudios sobre su efecto en los seres humanos. Un estudio sobre el transporte atmosférico de MP y NP, y el intercambio océano-atmósfera apunta a un ciclo plástico marino muy complejo, con implicaciones negativas para la salud humana y de los ecosistemas. No obstante, tampoco este estudio indica esas implicaciones negativas (Allen *et al.*, 2022).

### Regulaciones relacionadas con los MP y los NP

Existen pocas normas y regulaciones a nivel internacional respecto al análisis de los MP y NP. La Asamblea de las Naciones Unidas para el Medio Am-

biente (2014) realizó una investigación a nivel global sobre basuras marinas, enfocada en plásticos y MP, atendiendo diversas causas, entre ellas: “los graves efectos que las basuras marinas, en particular los plásticos procedentes de fuentes terrestres y marinas, pueden tener en el medio marino, los ecosistemas marinos, los recursos naturales marinos, la pesca, el turismo y la economía, así como sus posibles riesgos para la salud humana”.

En 2015, el Grupo de expertos del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) publicó un estudio específico sobre MP en el medio marino (GESAMP, 2015), y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura estudió el impacto de los MP en las especies pesqueras de consumo comercial. Entre las principales conclusiones se tiene un acusado incremento en el estudio de estos materiales por parte de ONG's, investigadores, políticos, organismos internacionales, medios de comunicación, entre otros. Se espera que este documento sirva de base para la toma de decisiones en los encargados de formular políticas. Se incluyen los tipos de fuentes, su distribución y destino, impactos ecológicos, y aspectos comerciales y socioeconómicos (Zamora-Bornachera *et al.*, 2021).

La ONU, en el año 2017, presentó una iniciativa denominada “20 formas de reducir el plástico en tu rutina” (ONU, 2018). Entre las que encontramos: usar un cepillo de dientes biodegradable de bambú con cerdas naturales; usar hilo dental de fibra natural recubierto con cera de abeja, pues la seda dental tradicional está hecha de nylon o teflón, que es el mismo material de una sartén antiadherente; evitar el uso de sartenes antiadherentes recubiertos de teflón; usar productos para el cabello que no contengan ingredientes plásticos como silicona y petróleo, entre otras disposiciones. Desafortunadamente, son recomendaciones muy puntuales y superficiales, basadas en el rechazo de ciertos productos y en reformulaciones. Las disposiciones deben incluir aspectos ambientales y sociales, así como económicos. Se deben considerar aspectos de prevención antes que remediación, basados en evidencia y conocimiento científico. Se debe incluir mucha capacitación y educación integral, y, por supuesto, considerar todos los actores de la sociedad. Posterior a esa iniciativa de la ONU, se publicó: “Límites legales de los productos plásticos y los microplásticos: examen a escala mundial de las leyes y los reglamentos nacionales”, del PNUMA en asociación con el World Resources Institute (WRI). Se incluyen: las características de las leyes y reglamentos nacionales; definiciones de MP y prohibiciones de su uso y fabricación; productos incluidos; exenciones; fechas de introducción; países involucrados; medidas de carácter voluntario; iniciativas voluntarias del gobierno y de la industria; el respaldo de los gobiernos regionales a la prohibición de las MP y otras iniciativas voluntarias (Excell *et al.*, 2018).

En ese documento se mencionan los 8 países que cuentan con regulaciones relacionadas con los MP que son Canadá, Estados Unidos, Francia, Nueva Zelanda, Reino Unido, Corea del Sur y Suecia (tabla 3). En algunas de esas regulaciones incluso se prohíbe el uso y la importación de productos relacionados con MP intencionales.

TABLA 3. Leyes y normas relacionadas con los MP.

País	Nombre de la ley o norma
Canadá	Reglamento sobre las micropartículas en los artículos de tocados, de 2017.
Estados Unidos	Ley de aguas sin micropartículas de 2015.
Francia	Ley de 2016 sobre la reivindicación de la biodiversidad, la naturaleza y el paisaje.
Italia	Ley de presupuesto general de 2018 y la Ley núm. 205 del 2017.
Nueva Zelanda	Reglamento sobre la reducción al mínimo de los desechos (micropartículas) de 2017. Ley de 2008 de reducción al mínimo de los desechos.
Reino Unido	Reglamento sobre la protección del medio ambiente (entre 2017 y 2018).
República de Corea	Reglamento sobre las normas de seguridad aplicables a los cosméticos.
Suecia	Reglamento relacionado con la manipulación, la importación y la exportación de productos químicos.

Fuente: Excell *et al.* (2018).

Para el año 2019 se publica el documento “Environmental and health risk of microplastic pollution”, por parte de la Comisión Europea SAM. Incluye una introducción a los plásticos, MP y los NP, así como políticas para prevenir y reducir la contaminación con MP, además de la cooperación global. El tema principal del documento incluye el eslogan “Haciendo a la ciencia parte del debate” (Muthu, 2021). En diciembre del 2020, se publicaron los resultados de la European Chemicals Agency (ECHA), dentro del Comité para la Evaluación de Riesgos y Análisis Socioeconómico, específicamente en temas de microplásticos intencionalmente agregados. Se ofrece una definición regulatoria de microplásticos, así como una legislación de microplásticos intencionalmente agregados (ECHA, 2020).

Para octubre de 2021, en el marco de la Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), dentro del marco del Environment Policy Committee, se dictaron las “Policies to reduce microplastics in water, Focus on textiles and tyres”. A diferencia de los anteriores informes, este se centra en el verdadero problema respecto a los microplásticos incidentales, es decir, los que se producen por el desgaste de las llantas y el lavado continuo de la ropa (OECD, 2021).

En los países que conforman la Red Micro y Nano Allpa Pacha no hay legislación definida respecto a la contaminación emergente por microplásticos y sus riesgos, sin embargo, empezaron a dictarse normativas en relación con plásticos de un solo uso en Colombia, Costa Rica, Perú, Panamá y Chile. Colombia ha reglamentado la gestión ambiental de los residuos de envases y empaques de papel, cartón, plástico, vidrio, metal y se toman otras determinaciones (Mi-

nisterio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018), así como en el Departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, mediante la Ley 1973, de 2019, a través de la cual se regula y prohíbe el ingreso, la comercialización y el uso de bolsas y otros materiales plásticos, exceptuando aquellos plásticos: reutilizables, biodegradables, reciclables, y que se demuestre su aprovechamiento a través del reciclaje o la recuperación energética, y que cuenten con un contenido de materia prima 100% reciclada (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Gobierno de Colombia, 2019).

En Ecuador, en el 2021, se presentó el documento “Compilación medio ambiente y obra pública”, siendo miembros plenos los representantes de Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Paraguay, Perú, Uruguay y Venezuela. Este documento surgió como producto de la inversión que han realizado los gobiernos —en los últimos años— en temas de infraestructura en materia de educación, vialidad y salud, entre otros, así como de las consecuencias ambientales que han generado todas estas obras públicas. Se presentan leyes como la “Ley N° 17.261 de 13 de Janeiro de 2020”, para prohibir el uso de ciertos plásticos de un uso (Riofrío *et al.*, 2021). En Chile, la Ley 21368, promulgada en el 2021, regula la entrega de plásticos de un solo uso y las botellas plásticas. Esta ley tiene como objetivo proteger el medio ambiente y disminuir la generación de residuos, mediante la limitación en la entrega de productos de un solo uso en establecimientos de venta de alimentos, el fomento a la reutilización y la certificación de los plásticos de un solo uso, así como de las botellas plásticas desechables (Riofrío *et al.*, 2021). En Ecuador, se emitió la ordenanza provincial, que promueve el consumo responsable mediante la regulación de la comercialización y distribución de productos plásticos desechables y envases desechables de poliestireno expandido (espumafón, espumaflex, estereofón) en las Islas Galápagos (Riofrío *et al.*, 2021).

En ese mismo sentido, para avanzar en la solución de la problemática, los presidentes de la República de Chile, de la República de Colombia, de los Estados Unidos Mexicanos, y de la República del Perú, reunidos en Lima, Perú, el 6 de julio de 2019, en la XIV Cumbre de la Alianza del Pacífico, firman la Declaración Presidencial Sobre la Gestión Sostenible de los Plásticos, con el propósito de promover la cooperación (SELA, 2019).

En el caso de Costa Rica, se han trabajado iniciativas para prohibir el uso de poliestireno en las instituciones. Hay algunas iniciativas en el gobierno respecto a los MP. Por otro lado, y con motivo de la celebración del Día Mundial de la Inocuidad de los Alimentos (7 de junio); el Ministerio de Economía, Industria y Comercio MEIC y CODEX de Costa Rica, bajo este contexto, organizaron una serie de paneles denominados “Inocuidad de los alimentos, un asunto de todos”. Uno de estos paneles fue “Procesos de normalización y regulación de la nanotecnología y los nanomateriales como prevención de la nanotoxicidad”. Participaron expositores de Argentina, México y Costa Rica, los dos primeros países con amplia experiencia en la temática, y mayores avances en los temas de nanorregulación.

Para 2022, aún no se han establecido normas específicas en el International Organization for Standardization (ISO), dentro de su Comité Técnico de Nanotecnología TC229, con el fin de evaluar la toxicidad de los NP, aunque sí hay otras normas generales para la evaluación de nanomateriales, como la norma ISO/TS 4988:2022 “Nanotechnologies – Toxicity assessment and bioassimilation of manufactured nano-objects in suspension using the unicellular organism *Tetrahymena sp*”, o la norma ISO 10808:2010 “Nanotechnologies – Characterization of nanoparticles in inhalation exposure chambers for inhalation toxicity testing”. Sin embargo, en el comité ISO/TR 21960:2020(en) del Comité de Plásticos —Aspectos ambientales—, se incluye ya una definición de los MP y los NP.

Para ese mismo año, se publica también un documento recopilatorio de políticas y regulaciones a nivel mundial sobre la polución de microplásticos, principalmente (Usman *et al.*, 2022). Esta revisión provee las estrategias de gobernanza global y local, actualmente destinadas a mitigar la contaminación plástica, sus limitaciones y direcciones futuras. Este estudio reveló varios aspectos de la contaminación por MP que no se consideran por falta de políticas; una laxitud en su implementación, así como una aparente falta de índices para determinar el impacto de las regulaciones. También indica que no existe una regulación sobre la contaminación de los alimentos y el agua potable por parte de los MP, lo cual se puede extender a los NP; tanto como una aparente falta de financiamiento para la investigación sobre los efectos de los plásticos en la salud y sus alternativas. El documento concluye indicando la necesidad de un enfoque bien coordinado a todo nivel, de tal forma que permita ampliar las políticas en todos los países, y llevarlas del papel a acciones medibles, holísticas y realizables en beneficio de la humanidad y su entorno (Usman *et al.*, 2022).

## La Red Micro y Nano Allpa Pacha

La red está conformada por científicos de Chile, Perú, Costa Rica, Colombia, Ecuador, Panamá y México. El objetivo principal es establecer una red de colaboración científica internacional para la geolocalización, monitoreo y caracterización de MP y NP presentes en las costas del Océano Pacífico en el continente americano, para aportar con evidencia y datos armonizados en la toma de decisiones, en la enseñanza y en la planificación de medidas de control y regulación de estos contaminantes. Se espera facilitar la cooperación entre investigadores de países de la costa del Pacífico americano, y así establecer una alianza científica en el desarrollo de temáticas afines a MP y NP por medio de estrategias de trabajo colaborativo interdisciplinar e internacional en estos estudios. Asimismo, unificar y armonizar criterios de estudio, incluyendo monitoreo y evaluación, así como toma y análisis de datos entre los diferentes países de la red.

Con la implementación de una red de monitoreo transnacional armonizada de MP y NP, se espera poder realizar comparativas entre los distintos

países y convertirnos en referente global. De igual forma, con la generación de *Big data*, se espera el progreso de estrategias de manejo entre los diferentes países de la red, con interés en el desarrollo sustentable. Por último, se confía en poder implementar instancias de educación relacionadas con MP y NP, empleando evidencias científicas, para apoyar un cambio de conducta en la población que aporte a disminuir la contaminación ambiental con plástico. Se esperaría, además, la incidencia en la creación y revisión de políticas nacionales respecto a los procesos de regulación en el sector plástiquero.

## Conclusiones

Los MP y los NP suponen un gran riesgo ambiental, al producir estos una contaminación imperceptible pero omnipresente en los distintos hábitats tanto acuáticos como terrestres. Este abundante auge tanto en contaminación como en estudio ha provocado que estos materiales hayan pasado a ser catalogados como contaminantes emergentes, que podrían tener el potencial de provocar un gran impacto ecológico, así como efectos adversos sobre la salud.

Los MP y los NP se están convirtiendo en un problema cada vez más apremiante, pues su presencia en el medio ambiente va en aumento, y no existen estrategias desarrolladas para su eliminación, siendo a su vez muy persistentes como material. Este contaminante puede provenir de multitud de fuentes, destacando las fuentes terrestres.

Existen muchas características de los MP y NP sin investigar, como la interacción con otros productos químicos, su impacto de la morfología en la biodisponibilidad, formación de adherencias y liberación de las mismas durante su contacto con los compartimentos ambientales, dependencia de su composición con su comportamiento y destino, entre otras.

Es importante buscar el diseño de bioensayos de laboratorio —bajo condiciones controladas— que simulen la exposición de los organismos a MP y NP en entornos naturales marinos, con el fin de reproducir las rutas transformativas que siguen estos materiales en el entorno.

Todo aporte a la mitigación del problema de los MP y NP debe incluir la concientización, la prevención y la reducción, mediante un enfoque integral de educación y capacitación, y considerando todos los actores de la sociedad, responsables de la problemática generada, bajo un enfoque de evidencia científica.

Con ese fin se creó la Red Micro y Nano Allpa Pacha, para aportar, con evidencia científica, metodologías y datos estandarizados en la toma de decisiones, en la enseñanza y en la planificación de medidas de control y aporte a la regulación de estos contaminantes en nuestros países y en nuestros ecosistemas.

## Referencias

Álvarez, G., Bonilla, A. (2020). *¿Cómo afectan los micro y macroplásticos en los océanos, y cuál es la situación en el Ecuador?* <http://www.yakumuseoagua.gob.ec/>.

- Allen, D., Allen, S., Abbasi, S., Baker, A., Bergmann, M., Brahney, J., Butler, T. M., Duce, R. A., Eckhardt, S., Evangeliou, N., Jickells, T., Kanakidou, M., Kershaw, P., Laj, P., Levermore, J., Li, D., Liss, P., Liu, K., Mahowald, N., Masque, P., Materić, D., Mayes, A. G., McGinnity, P., Osvath, I., Prather, K. A., Prospero, J. M., Revell, L. E., Sander, S. G., Shim, W. J., Slade, J., Stein, A., Tarasova, O., Wright, S. (2022). Microplastics and nanoplastics in the marine-atmosphere environment. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3: 393-405. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00292-x>.
- Amores-Monge, V., Goyanes, S., Ribba, L., Lopretti, M., Sandoval-Barrantes, M., Camacho, M., Corrales-Ureña, Y., Vega-Baudrit, J. R. (2022). Pineapple agro-industrial biomass to produce biomedical applications in a circular economy context in Costa Rica. *Polymers*, 14: 4864. <https://doi.org/10.3390/polym14224864>.
- Anbumani, S., Kakkar, P. (2018). Ecotoxicological effects of microplastics on biota: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(15): 14373-14396. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1999-x>.
- Barrett, T., Blixenkron-Møller, M., Di Guardo, G., Domingo, M., Duignan, P., Hall, A., Mamaev, L., Osterhaus, A. D. (1995). Morbilliviruses in aquatic mammals: report on round table discussion. *Veterinary Microbiology*, 44(2-4): 261-265. [https://doi.org/10.1016/0378-1135\(95\)00019-7](https://doi.org/10.1016/0378-1135(95)00019-7).
- Bermúdez-Guzmán, L., Alpizar-Villalobos, C., Gatgens-García, J., Jiménez-Huezo, G., Rodríguez-Arias, M., Molina, H., Villalobos, J., Paniagua, S. A., Vega-Baudrit, J. R., Rojas-Jiménez, K. (2020). Microplastic ingestion by a herring *Opisthonema* sp. in the Pacific coast of Costa Rica. *Regional Studies in Marine Science*, 38: 101367. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101367>.
- Boucher, J., Friot, D. (2017). *Primary microplastics in the oceans: a global evaluation of sources*. Gland, Switzerland: IUCN, 43. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2017.01>.
- Boyero, L., López-Rojo, N., Bosch, J., Alonso, A., Correa-Araneda, F., Pérez, J. (2020). Microplastics impair amphibian survival, body condition and function. *Chemosphere*, 244: 125500. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125500>.
- Carrere, M. (2019). No existe un solo lugar en las Galápagos libre de plástico. <https://es.mongabay.com/2019/05/ecuador-contaminacion-plastico-galapagos-video/>.
- Chaber, A. L. (2018). The era of human-induced diseases. *Ecohealth*, 15(1): 8-11. <https://doi.org/10.1007/s10393-017-1299-9>.
- Chagnon, C., Thiel, M., Antunes, J., Ferreira, J. L., Sobral, P., Christian Ory, N. (2018). Plastic ingestion and trophic transfer between Easter Island flying fish (*Cheilopogon rapanouiensis*) and yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) from Rapa Nui (Easter Island). *Environmental Pollution*, 243: 127-133. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.042>.
- Chiu, H. W., Xia, T., Lee, Y. H., Chen, C. W., Tsai, J. C., Wang, Y. J. (2015). Cationic polystyrene nanospheres induce autophagic cell death through the induction of endoplasmic reticulum stress. *Nanoscale*, 7(2): 736-746. <https://doi.org/10.1039/C4NR05509H>.
- Collard, F., Gilbert, B., Eppe, G., Parmentier, E., Das, K. (2015). Detection of anthropogenic particles in fish stomachs: an isolation method adapted to identifica-

- tion by Raman spectroscopy. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 69(3): 331-339. <https://doi.org/10.1007/s00244-015-0221-0>.
- Cornejo-D'Ottone, M., Molina, V., Pavez, J., Silva, N. (2020). Greenhouse gas cycling by the plastisphere: The sleeper issue of plastic pollution. *Chemosphere*, 246: 125709. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125709>.
- Corradini, F., Meza, P., Eguiluz, R., Casado, F., Huerta-Lwanga, E., Geissen, V. (2019). Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal. *Science of The Total Environment*, 671: 411-420. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.368>.
- Cox, K. D., Covernton, G. A., Davies, H. L., Dower, J. T., 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>.
- Cózar, A., Echevarría, F., González-Gordillo, J. I., Irigoien, X., Úbeda, B., Hernández-León, S., Palma, A. T., Navarro, S., García-de-Lomas, J., Ruiz, A., Fernández-de-Puelles, M. L. Duarte, C. M. (2014). Plastic debris in the open ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(28): 10239. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1314705111>.
- Crawford, C. B., Quinn, B. (2017). 6 - The interactions of microplastics and chemical pollutants. *Microplastic Pollutants*, 131-157. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-04315-5>.
- Croxatto Vega, G., Gross, A., Birkved, M. (2021). The impacts of plastic products on air pollution – A simulation study for advanced life cycle inventories of plastics covering secondary microplastic production. *Sustainable Production and Consumption*, 28: 848-865. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.07.008>.
- De la Torre, G., Mendoza Castilla, L., Carhuapoma, R. L. (2019). Microplastic contamination in market bivalve *Argopecten purpuratus* from Lima, Peru. *Manglar*, 16: 85-89. <http://dx.doi.org/10.17268/manglar.2019.012>.
- 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>.
- Dudek, K. L., Cruz, B. N., Polidoro, B., Neuer, S. (2020). Microbial colonization of microplastics in the Caribbean Sea. *Limnology and Oceanography Letters*, 5 (1): 5-17. <https://doi.org/10.1002/lol2.10141>.
- ECHA (European Chemicals Agency). (2020). Committee for Risk Assessment (RAC). Committee for Socio-economic Analysis (SEAC). ECHA/RAC/RES-O-0000006790-71-01/F. *Opinion on an Annex XV dossier proposing restrictions on intentionally-added microplastics*. <https://echa.europa.eu/documents/10162/5a730193-cb17-2972-b595-93084c4f39c8>.
- Enyoh, C. E., Shafea, L., Verla, A. W., Verla, E. N., Qingyue, W., Chowdhury, T., Paredes, M. (2020). Microplastics exposure routes and toxicity studies to ecosystems: an overview. *Environmental Analysis Health and Toxicology*, 35(1): e2020004. <https://doi.org/10.5620/eaht.e2020004>.
- Eriksen, M., Lebreton, L. C. M., Carson, H. S., Thiel, M., Moore, C. J., Borrorro, J. C., Galgani, F., Ryan, P. G., Reisser, J. (2014). Plastic pollution in the world's oceans:

- more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. *PLOS ONE*, 9(12): e111913. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>.
- Excell, C., Salcedo-La Viña, C., Worker, J., Moses, E. (2018). *Legal limits on single-use plastics and microplastics: a global review of national laws and regulation*. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya, 1-118.
- Fernández-Ojeda, C., Costa Muniz, M., Pereira Cardoso, R., Meigikos dos Anjos, R., Huaranga, E., Nakazaki, C., Henostroza, A., Garcés-Ordóñez, O. (2021). Plastic debris and natural food in two commercially important fish species from the coast of Peru. *Marine Pollution Bulletin*, 173: 113039. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113039>.
- Free, C. M., Jensen, O. P., Mason, S. A., Eriksen, M., Williamson, N. J., Boldgiv, B. (2014). High-levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake. *Marine Pollution Bulletin*, 85(1): 156-163. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.06.001>.
- Furukuma, S., Fujii, N. (2016). *In vitro* cytotoxicity evaluation of plastic marine debris by colony-forming assay. *Japanese Journal of Environmental Toxicology*, 19(2): 71-81. [10.11403/jset.19.71](https://doi.org/10.11403/jset.19.71). <https://doi.org/10.11403/jset.19.71>.
- Galloway, T. S. (2015). Micro- and nano-plastics and human health. En Melanie Bergmann, Lars Gutow y Michael Klages (eds.), *Marine Anthropogenic Litter*. Cham: Springer International Publishing, 343-366. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3\\_13](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_13).
- Garcés-Ordóñez, O., Mejía-Esquivia, K. A., Sierra-Labastidas, T., Patiño, A., Blandón, L. M., Espinosa Díaz, L. F. (2020). Prevalence of microplastic contamination in the digestive tract of fishes from mangrove ecosystem in Cispata, Colombian Caribbean. *Marine Pollution Bulletin*, 154: 111085. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111085>.
- Geiser, M., Rothen-Rutishauser, B., Kapp, N., Schürch, S., Kreyling, W., Schulz, H., Semmler, M., Vinzenz, I. H., Heyder, J., Gehr, P., (2005). Ultrafine particles cross cellular membranes by nonphagocytic mechanisms in lungs and in cultured cells. *Environmental Health Perspectives*, 113(11): 1555-1560. <https://doi.org/10.1289/ehp.8006>.
- Gennip, S. J. V., Dewitte, B., Garçon, V., Thiel, M., Popova, E., Drillet, Y., Ramos, M., Yannicelli, B., Bravo, L., Ory, N., Luna-Jorquera, G., Gaymer, C. F. (2019). In search for the sources of plastic marine litter that contaminates the Easter Island Ecoregion. *Scientific Reports*, 9(1): 19662. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56012-x>.
- GESAMP. (2015). *Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment* (Koehler, A., Anderson, A., Andrady, A., Arthur, C., Baker, J., Bouwman, H., Gall, S., Hidalgo-Ruz, V., Koehler, A., Law, K., Leslie, H., Kershaw, P., Pahl, S., Potemra, J., Ryan, P., Shim, W., Thompson, R., Takada, H., Turra, A., Wyles, K., (eds.)). IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP. Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection. Rep. Stud. GESAMP: No. 90. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.3803.7925>. (Consultado, noviembre 4, 2022).

- Geyer, R., Jambeck, J. R., Lavender Law, K. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7): e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.
- Gong, Y., Wang, Y., Chen, L., Li, Y., Chen, X., Liu, B. (2021). Microplastics in different tissues of a pelagic squid (*Dosidicus gigas*) in the northern Humboldt Current ecosystem. *Marine Pollution Bulletin*, 169: 112509. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112509>.
- Harder, T. C., M. Harder, H. Vos, K. Kulonen, S. Kennedy-Stoskopf, B. Liess, M. J. Appel, y A. D. Osterhaus. (1996). Characterization of phocid herpes virus-1 and -2 as putative alpha- and gamma herpes viruses of North American and European pinnipeds. *Journal of General Virology*, 77(Pt,1): 27-35. <https://doi.org/10.1099/0022-1317-77-1-27>.
- Hartmann, N. B., Skjolding, L. M., Nolte, T., Baun, A. (2016). Aquatic ecotoxicity testing of nanoplastics – lessons learned from nanoecotoxicology. En *SETAC Europe 26th Annual Meeting – abstract book*. Nantes, France: SETAC Europe, 43-44.
- Hinojosa, I. A., Thiel, M. (2009). Floating marine debris in fjords, gulfs and channels of southern Chile. *Marine Pollution Bulletin*. 58(3): 341-350. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.10.020>.
- Horton, A. A., Dixon, S. J. (2018). Microplastics: an introduction to environmental transport processes. *WIREs Water*. 5(2): e1268. <https://doi.org/10.1002/wat2.1268>.
- Huang, W., Song, B., Liang, J., Niu, Q., Zeng, G., Shen, M., Deng, J., Luo, Y., Wen, X., Zhang, Y.(2021). Microplastics and associated contaminants in the aquatic environment: A review on their ecotoxicological effects, trophic transfer, and potential impacts to human health. *Journal of Hazardous Materials*, 405: 124187. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124187>.
- Isobe, A., Iwasaki, S., Uchida, K., Tadashi, T. (2019). Abundance of non-conservative microplastics in the upper ocean from 1957 to 2066. *Nature Communications*, 10(1): 417. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08316-9>.
- Kalčíková, G. (2020). Aquatic vascular plants – A forgotten piece of nature in microplastic research. *Environmental Pollution*, 262: 114354. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114354>.
- Karami, A. (2017). Gaps in aquatic toxicological studies of microplastics. *Chemosphere*, 184: 841-848. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.048>.
- Kelly, F. J., Fussell, J. C. (2012). Size, source and chemical composition as determinants of toxicity attributable to ambient particulate matter. *Atmospheric Environment*, 60: 504-526. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.06.039>.
- Kirstein, I. V., Kirmizi, S., Wichels, A., Garin-Fernandez, A., Erler, R., Löder, M., Gerdt, G. (2016). Dangerous hitchhikers? Evidence for potentially pathogenic *Vibrio* spp. on microplastic particles. *Marine Environmental Research*, 120: 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.07.004>.
- Lavers, J. L., Bond, A. L. (2017). Exceptional and rapid accumulation of anthropogenic debris on one of the world's most remote and pristine islands. *Proceedings*

of the National Academy of Sciences, 114(23): 6052. <https://doi.org/10.1073/pnas.1619818114>.

- Lecot, N., Gandaras, R., Batista-Menezes, D., Montes de Oca-Vásquez, G., Cabral, P., García, M. F., Vega-Baudrit, J., Cerecetto, H., Lopretti, M. (2021). Preparation and characterization of a novel nanocellulose-derivative as a potential radiopharmaceutical agent. *Waste and Biomass Valorization*, 13: 173-183. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01495-x>.
- Lehner, R., Weder, C., Petri-Fink, A., Rothen-Rutishauser, B. (2019). Emergence of nanoplastic in the environment and possible impact on human health. *Environmental Science & Technology*, 53(4): 1748-1765. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05512>.
- Liu, M., Zhong, C., Zhang, Y. M., Xu, Z. M., Qiao, C. S., Jia, S. R. (2016). Metabolic investigation in *Gluconacetobacter xylinus* and its bacterial cellulose production under a direct current electric field. *Frontiers in Microbiology*. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00331>.
- Lu, Y., Zhang, Y., Deng, Y., Jiang, W., Zhao, Y., Geng, J., Ding, L., Ren, H. (2016). Uptake and accumulation of polystyrene microplastics in zebrafish (*Danio rerio*) and toxic effects in liver. *Environmental Science & Technology*, 50(7): 4054-4060. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00183>.
- Mazariegos Ortiz, C. H., Xajil-Sabán, M., Blanda, E., Delvalle-Borrero, D. (2021). Ocurrencia de microplásticos en el tracto digestivo de peces de la Reserva Natural de Usos Múltiples Monterrico, Guatemala. *Ecosistemas*, 30(2): 2188. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2188>.
- Menezes, D. B., Diz, F. M., Romanholo Ferreira, L. F., Corrales, Y., Vega-Baudrit, J. R., Costa, L. P., Hernández-Macedo, M. L. (2021). Starch-based biocomposite membrane reinforced by orange bagasse cellulose nanofibers extracted from ionic liquid treatment. *Cellulose*, 28(7):4137-4149. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03814-w>.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Gobierno de Colombia. (2018). *Resolución 1407 de 2018. Por la cual se reglamenta la gestión ambiental de los residuos de envases y empaques de papel, cartón, plástico, vidrio, metal y se toman otras determinaciones*. Colombia. <https://es.scribd.com/document/429800938/resolucion-1407-de-2018-pdf>.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Gobierno de Colombia. (2019). *LEY N° 1973-2019: Por medio de la cual se regula y prohíbe el ingreso, comercialización y uso de bolsas y otros materiales plásticos en el Departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina e Islas Menores que lo componen, y se dictan otras disposiciones*. Colombia. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/ley-1973-2019.pdf>.
- Ministerio del Medio Ambiente, L. O. S. Cuerpos Legales, Q. U. E. Indica. (2021). *Ley 21368. Regula la entrega de plásticos de un solo uso y las botellas plásticas, y modifica los cuerpos legales que indica*. Chile: 1-7. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1163603>.
- Miranda, M., Trojzuck, A., Voss, D., Gassmann, S., Zielinski, O. (2016). Spectroscop-

- ic evidence of anthropogenic compounds extraction from polymers by fluorescent dissolved organic matter in natural water. *Journal of the European Optical Society - Rapid publications*, 11. <http://dx.doi.org/10.2971/jeos.2016.16014>.
- Mizraji, R., Ahrendt, C., Pérez-Venegas, D., Vargas, J., Pulgar, J., Aldana, M., Ojeda, P., Duarte, C., Galbán-Malagón, C. (2017). Is the feeding type related with the content of microplastics in intertidal fish gut? *Marine Pollution Bulletin*, 116(1): 498-500. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.008>.
- Mohan, B., He, Q., Chen, Y. (2020). What roles are terrestrial plants playing in global microplastic cycling? *Environmental Science & Technology*, 54(9): 5325-5327. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01009>.
- Mora-Sandí, A., Ramírez-González, A., Castillo-Henríquez, L., Lopretti-Correa, M., Vega-Baudrit, J. R. (2021). Persea americana agro-industrial waste biorefinery for sustainable high-value-added products. *Polymers*, 13(11). <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/11/1727>.
- Muthu, Subramanian Senthilkannan. (2021). *Microplastic pollution*. Singapore: Springer. ISSN 2662-7108. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-0297-9>.
- Oceans, JPI. (2020). Key results JPI oceans microplastics projects, 2016-2019. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.11658.00960>.
- OECD. (2021). Policies to reduce microplastics pollution in water, focus on textiles and tyres. 139. <https://doi.org/10.1787/7ec7e5ef-en>.
- ONU. (2018). *20 formas de reducir el plástico en tu rutina*. ONU-Desarrollo. <https://pnud.medium.com/20-formas-de-reducir-el-pl%C3%A1stico-en-tu-rutina-a1b0a0195132>.
- Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). (2020). *Ecuador: Un estudio de más de 10 años realizado en cooperación con el OIEA analiza la polución por microplásticos en el océano Pacífico tropical oriental*. <https://www.iaea.org/es/news-center/news/ecuador-estudio-microplasticos-pacifico-oriental>.
- Ory, N. C., Sobral, P., Ferreira, J. L., Thiel, M. (2017). Amberstripe scad *Decapterus muroadsi* (Carangidae) fish ingest blue microplastics resembling their copepod prey along the coast of Rapa Nui (Easter Island) in the South Pacific subtropical gyre. *Science of the Total Environment*, 586: 430-437. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.175>.
- Ory, N., Chagnon, C., Felix, F., Fernández, C., Ferreira, J. L., Gallardo, C., Garcés Ordóñez, O., Henostroza, A., Laaz, E., Mizraji, R., Mojica, H., Murillo Haro, V., Ossa Medina, L., Preciado, M., Sobral, P., Urbina, M. A., Thiel, M. (2018). Low prevalence of microplastic contamination in planktivorous fish species from the southeast Pacific Ocean. *Marine Pollution Bulletin*, 127: 211-216. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.12.016>.
- Ory, N. C., Gallardo, C., Lenz, M., Thiel, M. (2018). Capture, swallowing, and egestion of microplastics by a planktivorous juvenile fish. *Environmental Pollution*, 240: 566-573. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.093>.
- Peeken, I., Primpke, S., Beyer, B., Gütermann, J., Katlein, C., Krumpfen, T., Bergmann, T., Hehemann, L., Gerdt, G. (2018). Arctic sea ice is an important temporal sink and means of transport for microplastic. *Nature Communications*, 9(1): 1505.

<https://doi.org/10.1038/s41467-018-03825-5>.

- Peng, X., Chen, M., Chen, S., Dasgupta, S., Xu, H., Ta, K., Du, M., Li, J., Guo, Z., Bai, S. (2018). Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochemical Perspectives Letters*, 9: 1-5. <http://dx.doi.org/10.7185/geochem-let.1829>.
- Pérez-Venegas, D. J., Seguel, M., Paves, H., Pulgar, J., Urbina, M., Ahrendt, C., Galban-Malagon, C. (2018). First detection of plastic microfibers in a wild population of South American fur seals (*Arctocephalus australis*) in the Chilean Northern Patagonia. *Marine Pollution Bulletin*, 136: 50-54. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.08.065>.
- 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>.
- Pozo, K., Gómez, V., Torres, M., Vera, L., Núñez, D., Oyarzún, P., Mendoza, G., Clarke, B., Fossi, M. C., Baini, M., Přibylková, P., Klánová, J. (2019). Presence and characterization of microplastics in fish of commercial importance from the Biobío region in central Chile. *Marine Pollution Bulletin*, 140:315-319. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.01.025>.
- Purca, S., Henostroza, A. (2017). Presencia de microplásticos en cuatro playas arenosas de Perú. *Revista Peruana de Biología*, 24: 101-106. <http://dx.doi.org/10.15381/rpb.v24i1.12724>.
- Rech, S., Macaya-Caquilpán, V., Pantoja, J. F. Rivadeneira, M. M., Jofre Madariaga, D., Thiel, M. (2014). Rivers as a source of marine litter – A study from the SE Pacific. *Marine Pollution Bulletin*, 82(1): 66-75. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.03.019>.
- Rillig, M. C., Lehmann, A., de Souza Machado, A., Yang, G. (2019). Microplastic effects on plants. *New Phytologist*, 223(3): 1066-1070. <https://doi.org/10.1111/nph.15794>.
- Riofrío González, C., Vásquez Paredes, M. I., Aguilar Jurado, S. (2021). *Compilación de Obra Pública y Medio Ambiente 2021*. EFSUR. [www.EFSUR.com](http://www.EFSUR.com).
- Rosato, A., Barone, M., Negroni, A., Brigidi, P., Fava, P., Xu, P., Candela, M., Zanaroli, G. (2020). Microbial colonization of different microplastic types and biotransformation of sorbed PCBs by a marine anaerobic bacterial community. *Science of the Total Environment*, 705: 135790. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135790>.
- SELA. (2019). *La Alianza del Pacífico contra los plásticos de un solo uso. Declaraciones Presidenciales | Alianza del Pacífico*. <http://www.sela.org/es/imprimir/?n=45159>.
- Senathirajah, K., Attwood, S., Bhagwat, G., Carbery, M., Wilson, S., Palanisami, T. (2021). Estimation of the mass of microplastics ingested – A pivotal first step towards human health risk assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 404: 124004. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124004>.
- Shafqat, A., Al-Zaqri, N., Tahir, A., Alsalmeh, A. (2021). Synthesis and characterization of starch based bioplastics using varying plant-based ingredients, plasticizers and natural fillers. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(3): 1739-1749. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.12.015>.

- Shahul Hamid, F., Bhatti, M. S., Anuar, N., Anuar, N., Mohan, P., Periathamby, A. (2018). Worldwide distribution and abundance of microplastic: How dire is the situation? *Waste Management & Research*, 36(10): 873-897. <https://doi.org/10.1177/0734242X18785730>.
- Smith, M., Love, D. C., Rochman, C. M., Neff, R. A. (2018). Microplastics in seafood and the implications for human health. *Current Environmental Health Reports*, 5(3): 375-386. <https://doi.org/10.1007/s40572-018-0206-z>.
- Sobhani, Z., Zhang, X., Gibson, C., Naidu, R., Megharaj, M., Fang, C. 2020. Identification and visualisation of microplastics/nanoplastics by Raman imaging (i): Down to 100 nm. *Water Research*, 174: 115658. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115658>.
- Thiel, M., Luna-Jorquera, G., Álvarez-Varas, R., Gallardo, C., Hinojosa, I., Luna, N., Miranda-Urbina, D., Morales, N., Ory, N., Pacheco, A. S., Portflitt-Toro, M., Zavalaga, C. (2018). Impacts of marine plastic pollution from continental coasts to subtropical gyres—fish, seabirds, and other vertebrates in the SE Pacific. *Frontiers in Marine Science*, 5(238): 1-16. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00238>.
- Usman, S., Abdull Razis, A. F., Shaari, K., Azmai, M. N. A., Saad, M. Z., Mat Isa, N., Nazarudin, M. F. (2022). The burden of microplastics pollution and contending policies and regulations. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(11): 6773. <https://doi.org/10.3390/ijerph19116773>.
- Valavanidis, A., Vlachogianni, T., Fiotakis, K., Loridas, S. (2013). Pulmonary oxidative stress, inflammation and cancer: respirable particulate matter, fibrous dusts and ozone as major causes of lung carcinogenesis through reactive oxygen species mechanisms. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 10(9): 3886-907. <https://doi.org/10.3390/ijerph10093886>.
- Vega-Baudrit, J. (2021). *Microplásticos: algunos mitos y realidades. Hablemos de microplásticos, ¿Qué nos dice la ciencia?* Seminario virtual: Evidencia científica y los mitos sobre los nanoplasticos: análisis e innovación. En línea, 25/11/2021. ILSI Mesoamérica.
- Veropalumbo, R., Oreto, C., Viscione, N., Pirozzi, F., Pontoni, L., Trancone, G., Race, M., Russo, F. (2023). Exploring the effect on the environment of encapsulated micro- and nano-plastics into asphalt mastics for road pavement. *Environmental Research*, 216: 114466. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114466>.
- Villalobos-Vega, D., Vázquez-Vázquez, F. C., Pozos-Guillén, A., Avendaño, E., Vega-Baudrit, J. R., Álvarez-Pérez, M. A., Chavarría-Bolaños, D. (2021). Characterization and biocompatibility of a polylactic acid (PLA) 3D/printed scaffold. In Hemen Sarma, Sanket J. Joshi, Ram Prasad y Josef Jampilek (eds.), *Biobased Nanotechnology for Green Applications*. Cham: Springer International Publishing, 289-309. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-61985-5>.
- Watts, A. J. R., Urbina, M. A., Corr, S., Lewis, C., Galloway, T. S. (2015). Ingestion of plastic microfibers by the crab *carcinus maenas* and its effect on food consumption and energy balance. *Environmental Science & Technology*, 49(24): 14597-14604. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04026>.

- Watts, A. J. R., Urbina, M. A., Goodhead, R., Moger, J., Lewis, C., Galloway, T. S. (2016). Effect of microplastic on the gills of the shore crab *Carcinus maenas*. *Environmental Science & Technology*, 50(10): 5364-5369. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01187>.
- World Health Organization (WHO). (2020). *Zoonoses*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/zoonoses>.
- Yacobi, N. R., De Maio, L., Xie, J., Hamm-Alvarez, S. F., Borok, Z., Kim, K., Crandall, E. D. (2008). Polystyrene nanoparticle trafficking across alveolar epithelium. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 4(2): 139-145. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2008.02.002>.
- Zamora-Bornachera, A. P., Vivas Avendaño, D., Sierra-Correa, P. C. (2021). *Basuras marinas: opciones de política y recomendaciones para abordar la problemática en Colombia*. Santa Marta, Colombia: Publicaciones Generales, INVEMAR. ISBN: 978-958-8935-66-9. <https://n2t.net/ark:/81239/m9x12t>.
- Zangmeister, C. D., Radney, J. G., Benkstein, K. D., Kalanyan, B. (2022). Common single-use consumer plastic products release trillions of sub-100 nm nanoparticles per liter into water during normal use. *Environmental Science & Technology*, 56(9): 5448-5455. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06768>.