

**EFEECTO DE LOS MICROPLÁSTICOS Y
NANOPLÁSTICOS SOBRE EL FUNCIONAMIENTO
DE REACTORES BIOLÓGICOS DE TRATAMIENTO
DE AGUAS RESIDUALES**

**EFFECT OF MICROPLASTICS AND NANOPLASTICS
ON THE OPERATION OF BIOLOGICAL WASTEWATER
TREATMENT REACTORS**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA Y
GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS**

2021-2022

Presentado por:

D^a MARINA BASTANTE RABADÁN

Dirigido por:

Dra. D^a ANA KARINA BOLTES ESPÍNOLA

Alcalá de Henares, a 6 de Junio de 2022

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	4
RESUMEN	5
PALABRAS CLAVE	5
ABSTRACT	6
KEY WORDS	6
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	5
3. MÉTODOS	5
4. PLÁSTICOS: CLASIFICACIÓN Y MECANISMOS DE DEGRADACIÓN	6
4.1. <i>Clasificación de plásticos</i>	6
4.1.1. <i>Termoplásticos</i>	6
4.1.2. <i>Termoestables</i>	8
4.1.3. <i>Elastómeros</i>	8
4.1.4. <i>Bioplásticos</i>	8
4.2. <i>Degradación de los plásticos: formación de microplásticos</i>	8
4.2.1. <i>Fuentes de emisión de microplásticos</i>	11
4.2.2. <i>Métodos de muestreo, identificación y cuantificación en las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales</i>	11
5. EFECTOS DE LOS MICRO Y NANOPLÁSTICOS	14
5.1. <i>Efectos en los ecosistemas y organismos</i>	14
5.2. <i>Estaciones depuradoras de aguas residuales</i>	17
5.2.1. <i>Tratamiento primario</i>	19
5.2.2. <i>Tratamiento secundario</i>	20
5.2.2.1. <i>Reactores aerobios</i>	20
5.2.2.2. <i>Reactores anaerobios</i>	21
6. TECNOLOGÍAS DE ELIMINACIÓN DE MICROPLÁSTICOS EN LAS ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES	24
6.1. <i>Físicos</i>	24
6.2. <i>Químicos</i>	25
6.3. <i>Biológicos</i>	26
6.4. <i>Eliminación de microplásticos en pequeñas aglomeraciones urbanas: humedales</i>	30
7. PERSPECTIVAS DE FUTUROS ESTUDIOS	32
8. CONCLUSIONES	33
BIBLIOGRAFÍA	34

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figuras

Figura 1. Tipos de tratamientos biológicos y las diferentes configuraciones de reactor.....	3
Figura 2. Configuración de una estación depuradora de aguas residuales.....	4
Figura 3. Tamaños de plásticos.....	9

Tablas

Tabla 1. Tipos de plásticos, propiedades principales y usos.....	7
Tabla 2. Formas de microplásticos más abundantes en diferentes medios.....	10
Tabla 3. Métodos de muestreo en aguas residuales.....	12
Tabla 4. Técnicas de identificación y cuantificación, ventajas y desventajas.....	13
Tabla 5. Efectos causados por diferentes tipos de plásticos sobre diversos organismos.....	16
Tabla 6. Resumen de los efectos de los plásticos en las diferentes tecnologías de tratamiento de agua residual.....	23
Tabla 7. Tipos de microplásticos y microorganismos capaces de degradarlos.....	29

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutora Dra/Dña Ana Karina Boltes Espínola por la ayuda y tiempo que me ha brindado a lo largo de estos meses y por fomentar mi curiosidad sobre el tema del Trabajo de Fin de Máster.

Por último, quiero agradecer a todos los docentes del Máster por haberme formado durante este año, a todos los compañeros y familiares que han contribuido leyendo y aportando ideas en este trabajo.

Muchas gracias.

RESUMEN

Los micro y nanoplásticos son considerados contaminantes de preocupación emergente, los cuales se han convertido en un problema mundial por su ubicuidad en ecosistemas acuáticos, terrestres y aéreos. Sus características tales como hidrofobicidad les posibilita para adsorber en su superficie microorganismos y contaminantes, actuando como vectores de contaminación. Los principales emisores de micro y nanoplásticos a los ecosistemas son las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), las cuales mediante diferentes procesos y operaciones logran eliminar parte de estos contaminantes, pero cierta fracción escapa al ecosistema fluvial y terrestre causando efectos en dicho ecosistema y a las especies que allí habitan, incluidos los seres humanos. Estos materiales también causan daños en las instalaciones de las estaciones depuradoras, produciendo diferentes alteraciones en los reactores biológicos, por ello, conviene retirarlos del agua mediante diferentes mecanismos. También se contemplan los humedales tanto como tratamiento terciario de las estaciones depuradoras y como tratamiento de las aguas residuales de pequeñas aglomeraciones urbanas y zonas rurales.

PALABRAS CLAVE

“Microplásticos”, “Nanoplásticos”, “EDAR”, “Reactores Aerobios”, “Reactores Anaerobios”, “Efectos”, “Mecanismos de Eliminación”.

ABSTRACT

Micro and nanoplastics are considered pollutants of emerging concern, which have become a global problem due to their ubiquity in aquatic, terrestrial and aerial ecosystems. Their characteristics such as hydrophobicity allow them to adsorb microorganisms and contaminants on their surface, acting as vectors of contamination. The main emitters of micro and nanoplastics to ecosystems are wastewater treatment plants (WWTP), which through different processes and operations manage to eliminate part of these pollutants, but a certain fraction escapes the fluvial and terrestrial ecosystem causing effects on that ecosystem and the species that inhabit there, including humans. These materials also cause damage to the facilities of the treatment plants, producing different alterations in the biological reactors, therefore, it is convenient to remove them from the water through different mechanisms. Wetlands are also considered both as tertiary treatment of treatment plants and as wastewater treatment of small urban agglomerations and rural areas.

KEY WORDS

"Microplastics", "Nanoplastics", "WWTP", "Aerobic Reactors", "Anaerobic Reactors", "Effects", "Removal Mechanisms".

1. INTRODUCCIÓN

El plástico se ha convertido en un material esencial en la vida de las personas, utilizándose ampliamente en diferentes áreas como la medicina, la agricultura, la industria agroalimentaria, y sectores como el del embalaje (Godoy *et al.*, 2019). Este material se ha utilizado a escala global debido a su facilidad de uso, rentabilidad, durabilidad, plasticidad, entre otras características (Wijesekara *et al.*, 2018). En los años 50 se produjeron un millón y medio de toneladas de plástico y, hasta 2016, la producción ha alcanzado los 335 millones de toneladas. Ese aumento de la producción ha generado un incremento en la cantidad de residuos que los plásticos originan y, junto a su mala gestión, provocan la contaminación de los ecosistemas (Godoy *et al.*, 2019).

Los residuos plásticos, una vez que llegan al medio ambiente, están sujetos a procesos fisicoquímicos de degradación, que conllevan su disgregación en fragmentos de menor tamaño. Cuando éste es inferior a 5 mm se denominan microplásticos (MPs). Estos, junto con las partículas incluso de tamaño inferior derivadas a partir de ellos, los denominados nanoplásticos (NPs) (0,001 - 0,1 μm), generan gran preocupación por su potencial ecotoxicidad, capacidad de bioacumulación en los seres vivos y magnificación en la cadena trófica (Wang *et al.*, 2020).

Los micro y nanoplásticos son considerados contaminantes de preocupación emergentes (Azizi *et al.*, 2022), es decir, compuestos desconocidos o no reconocidos cuya presencia en el medio ambiente, alimentos o agua, en cualquier producto natural o artificial, o en cualquier ser vivo, no es necesariamente nueva, pero sí es el conocimiento de las posibles consecuencias perjudiciales de su existencia. La superficie de los microplásticos proporciona un nicho adecuado para la formación de biopelículas, denominado "plastisfera" (Zettler *et al.*, 2013), pudiendo así actuar como vectores para transportar diversos contaminantes a través del agua al suelo. La hidrofobicidad y la alta relación superficie-volumen de los microplásticos facilitan la adhesión de diversos compuestos, especialmente los contaminantes orgánicos e hidrófobos (HOC), incluidos los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), los bifenilos policlorados (PCB), las sustancias

perfluoroalquiladas (PFAS), los diéters polibromados (PBD), los productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPPC) (Atugoda *et al.*, 2020), además de metales pesados de origen natural (contenido en la corteza terrestre) o antrópico (producido por actividades como la minería, industrias químicas).

El efecto perjudicial de la presencia de estas micro y nanoesferas ha sido ampliamente estudiado en ecosistemas acuáticos, pero también hay presencia de estas en ecosistemas de agua dulce, en los sedimentos, en el suelo y en la atmósfera (Liu *et al.*, 2021). Los microplásticos se introducen en los suelos a través de diferentes fuentes, entre las que se incluyen las aguas residuales domésticas y utilizadas para riego, lodos de depuradora, fertilizantes, vertederos de centros urbanos e industriales, riego con aguas residuales depuradas, vertido ilegal de residuos, entre otras (Chae & An, 2018).

Las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) tienen por objetivo el saneamiento de las aguas y asegurar que su calidad esté en condiciones óptimas antes de devolverla a los cauces, mediante la eliminación de los sólidos en suspensión y la materia orgánica presente en el agua. Este proceso se lleva a cabo a través de un complejo sistema que consta de redes de drenaje urbano, colectores y emisarios, que captan el agua hasta las depuradoras. Una vez allí, el agua se somete a diferentes tratamientos, que se describen a continuación:

El pretratamiento de las aguas residuales se define como el proceso de eliminación de los constituyentes de las aguas residuales cuya presencia pueda provocar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los diferentes procesos, operaciones y sistemas auxiliares. Consta de desbaste (mediante el uso de rejillas de diferentes tamaños y configuraciones; y tamices), homogeneización y regulación del caudal (mediante grandes depósitos), desarenado (sedimentación) y desengrasado (flotación aplicando aire para eliminar las grasas y aceites).

Tras el pretratamiento, el agua se somete a tratamientos primarios, los cuales son los procesos o conjunto de procesos que tienen la misión de separar por medios físicos y/o químicos las sustancias en suspensión no retenidas por el pretratamiento. También se incluyen los tratamientos que requieren la adición de

productos químicos o coagulantes que rompen el estado coloidal de las partículas y forman flóculos de gran tamaño, de manera que decantan más rápidamente. Según la legislación, debe suponer la separación de al menos el 20% de la DBO y el 50% de los sólidos en suspensión. Los procesos que pueden incluirse en el tratamiento primario son: coagulación-floculación, sedimentación y flotación.

El tratamiento secundario se refiere a los procesos de tratamiento biológico de aguas residuales, tanto aerobios como anaerobios. Constituye una etapa clave en la eliminación de sustancias coloidales no sedimentables y materia orgánica disuelta y ha de incluir una sedimentación secundaria. En la figura 1 se puede observar los diferentes tipos de tratamientos biológicos y las diferentes configuraciones de reactor.

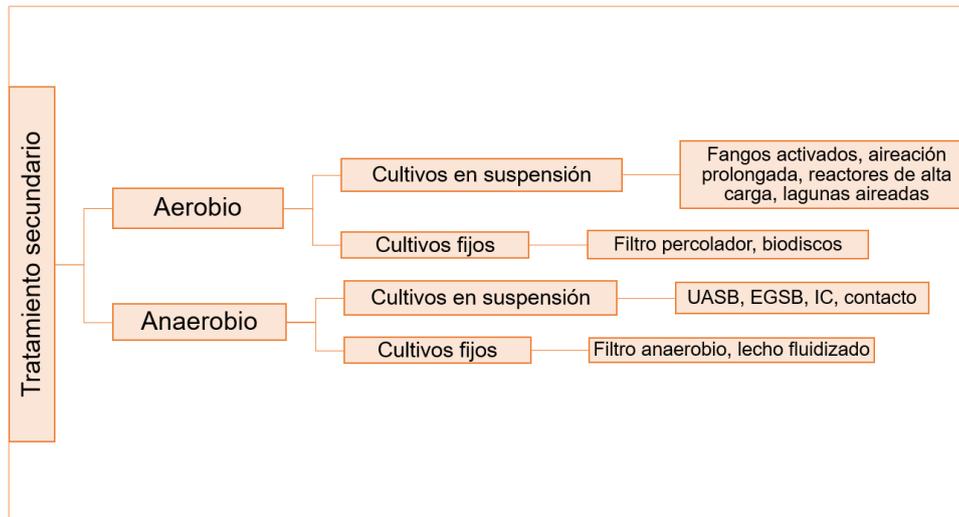


Figura 1. Tipos de tratamientos biológicos y las diferentes configuraciones de reactor.

Las estaciones de aguas residuales cuentan con una línea de fangos, donde se llevan a cabo una serie de operaciones para reducir el volumen de los lodos procedentes de las sedimentaciones primaria y secundaria, previos a su evacuación. Normalmente incluye algunas de las siguientes operaciones: digestión anaerobia, espesado (floculación, sedimentación, flotación) y secado (filtración, centrifugación, eras de secado).

Algunas estaciones depuradoras cuentan también con un tratamiento terciario de las aguas cuando se exige que el vertido de las aguas residuales tenga unas determinadas concentraciones para ciertas sustancias, casi siempre debido al uso

posterior del agua, es necesario emplear métodos de tratamiento especiales, tales como filtración, oxidación y adsorción.

En la siguiente figura (figura 2) se puede observar una configuración de estación depuradora de aguas residuales.

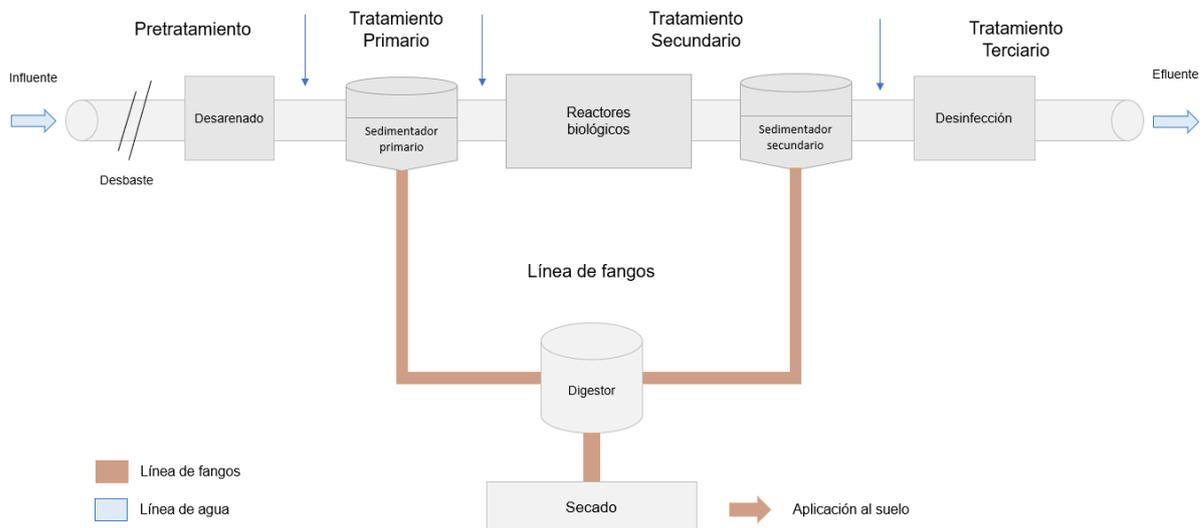


Figura 2. Configuración de una estación depuradora de aguas residuales.

Dichas estaciones depuradoras son consideradas como la principal fuente de emisión de microplásticos al ecosistema acuático al actuar como punto de encuentro de los provenientes de la deposición atmosférica y de las aguas domésticas e industriales (Liu *et al.*, 2021; Bakaraki Turan *et al.*, 2021). Como se han definido anteriormente, cuentan con una serie de tratamientos donde mediante determinados procesos se logra la eliminación parcial de los microplásticos del efluente, pero transmitiéndose a los fangos de depuradora (Long *et al.*, 2022). Con la tendencia a la economía circular, los lodos de depuradora se utilizan muy frecuentemente en la agricultura como fertilizante, transportando así estos compuestos al sistema terrestre (Edo *et al.*, 2020).

2. OBJETIVOS

Este trabajo tiene como objetivo general analizar la problemática relacionada con la presencia de micro y nanoplásticos en las estaciones depuradoras de aguas residuales en los reactores biológicos.

Para ello, se establecen los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar los materiales plásticos que ingresan en dichas estaciones y clasificarlos por abundancia y composición química.
2. Analizar las transformaciones que sufren estos materiales en las EDAR, incidiendo en los biorreactores tanto aerobios como anaerobios.
3. Describir las tecnologías disponibles para la eliminación de los micro y nanoplásticos en las EDAR.

3. MÉTODOS

Este trabajo es meramente bibliográfico, con lo cual la metodología llevada a cabo ha sido una revisión de diferentes artículos y revistas científicas enfocadas a la problemática de los micro y nanoplásticos en las estaciones depuradoras de aguas residuales y los efectos causados en estas y en los ecosistemas, además de los efectos causados en los organismos de estos medios.

Las principales fuentes de información utilizadas en esta revisión bibliográfica fueron Scopus, Elsevier, Google Scholar, y Google para buscar diferentes tesis con dicha temática. La mayoría de los artículos científicos encontrados fueron en revistas de idioma anglosajón y se seleccionaron aquellos en el rango entre 2018 y 2022, a excepción de tres de ellos que son de 2013 y 2014, los cuales aún siguen actualizados. La búsqueda se realizó mediante las palabras clave “microplastics”, “nanoplastics”, “waste water treatment plants”, “waste water”, “efectts”, “anaerobic process”, “aerobic process”, “microplastic removal”, “nanoplastic removal”.

4. PLÁSTICOS: CLASIFICACIÓN Y MECANISMOS DE DEGRADACIÓN

4.1. *Clasificación de plásticos*

Los plásticos son definidos como polímeros, es decir, materiales sólidos, que se vuelven moldeables una vez aplicado calor, adquiriendo cualquier forma y conservándola durante un gran periodo de tiempo, ya que son materiales duraderos y son degradados a una velocidad muy lenta. Son polímeros de cadena larga de hidrocarburos con un alto peso molecular y son derivados de productos petroquímicos. En la vida cotidiana de las personas aparecen en diferentes formas como las bolsas, botellas, pajitas, detergentes, productos de higiene personal, tarjetas, juguetes, biberones, entre otros muchos artículos (Naimatul *et al.*, 2015).

Existen diversas clases de plásticos, diferenciadas en composición, forma y usos. En cuanto a su estructura interna encontramos los siguientes:

4.1.1. Termoplásticos

Estos materiales tienen la posibilidad de volver a fundirse y de ser reciclados (Meza Vargas, 2013). La clasificación que se muestra a continuación se realizó en 1998 por la Sociedad Industrial del Plástico, con la intención de que tanto consumidores como recicladores supieran identificar qué tipo de plástico utilizaban. Se distinguen con un código numérico que va del uno al siete y que permite diferenciar entre los tipos de plásticos existentes (Naimatul *et al.*, 2015), los cuales se representan en la siguiente tabla (tabla 1).

Tabla 1. Tipos de plásticos, propiedades principales y usos (Editada de Naimatul et al., 2015).

TIPOS DE PLÁSTICO		PROPIEDADES	USOS
Polietileno tereftalato (PET/PETE) 01		<ul style="list-style-type: none"> Resistente contra la humedad y los gases Resistente a varios disolventes Deja penetrar las ondas de un microondas Resistencia al calor Duro 	<ul style="list-style-type: none"> Botellas de agua mineral Botellas de refrescos Bolsas Bandejas de comida preparada Fibra para ropas
Polietileno de alta densidad (HDPE) 02		<ul style="list-style-type: none"> Excelente barrera contra la humedad ambiental Gran resistencia química Pigmentación Semiflexibles 	<ul style="list-style-type: none"> Botellas de detergentes y lejías Botellas de leche Juguetes Muebles de jardín Contenedores para abono
Cloruro de polivinilo (PVC) 03		<ul style="list-style-type: none"> Duro y rígido Alta resistencia química Gran estabilidad a largo plazo Propiedades eléctricas estables Baja permeabilidad a los gases 	<ul style="list-style-type: none"> Tarjetas de crédito Ventanas y canalones Tuberías Revestimiento para cables
Polietileno de baja densidad (LDPE) 04		<ul style="list-style-type: none"> Resistentes y flexibles Superficie lisa y suave Punto de fusión bajo Buena barrera contra la humedad Propiedades eléctricas estables 	<ul style="list-style-type: none"> Bolsas de basura Plástico para embalajes Tapas de botellas Botellas más flexibles Tubos para riego
Polipropileno (PP) 05		<ul style="list-style-type: none"> Excelente resistencia química Alto punto de fusión Duro pero flexible Translúcido y fuerte 	<ul style="list-style-type: none"> Tapas de botellas Envases de yogurt y algunos envases de margarina Bolsas de patatas fritas Pajitas Tuppers
Poliestireno (PS) 06		<ul style="list-style-type: none"> Superficie vidriosa Frágil Duro Afectado por gases y disolventes Opaco 	<ul style="list-style-type: none"> Juguetes de bajo coste Vasos desechables Cubiertos desechables Hueveras Bandejas de comida rápida Discos Perchas
Otros (Other) 07		<ul style="list-style-type: none"> Tienen una amplia gama de propiedades con diferentes usos a nivel industrial, los cuales se diferencian del número 7 al 19 	<ul style="list-style-type: none"> Nilón Policarbonato Mezclas de múltiples materiales con polímeros

4.1.2. Termoestables

Estos plásticos se degradan con el calor, solo se pueden fundir una vez, tienen una baja capacidad de ser reciclados, son duros y frágiles. Entre ellos se encuentran el poliuretano (PUR), las resinas fenólicas y la melamina (Meza Vargas, 2013).

4.1.3. Elastómeros

Tienen un alto grado de plasticidad, son materiales blandos y solo pueden ser fundidos una vez. Es un estado intermedio entre las dos clases anteriores. Dentro de este grupo se encuentran el caucho, tanto natural como sintético y el neopreno (Meza Vargas, 2013).

4.1.4. Bioplásticos

Pero estos plásticos pueden clasificarse en diversas categorías más, las mencionadas anteriormente son los plásticos sintéticos, los derivados de compuestos fósiles. Existen otra clase que son los plásticos naturales, como los bioplásticos derivados de productos vegetales o producidos por determinadas cepas bacterianas.

De dichos plásticos hay tres tipos; *polímeros directamente provenientes de plantas y animales*: se incluyen polisacáridos (celulosa, almidón) y proteínas (gluten); *polímeros sintetizados químicamente*: se incluyen los monómeros como el ácido poliláctico (PLA: biopolíester polimerizado a partir de monómeros de ácido láctico); *polímeros sintetizados por microorganismos*: se incluyen los polihidroxicanoatos (PHA) (Coletto, N., 2014).

4.2. *Degradación de los plásticos: formación de microplásticos*

Como se ha mencionado anteriormente, la principal característica es su durabilidad, con lo cual, son persistentes en el medio, llegando a tener una vida media de 1 a 50 años antes de que se desechen o que se reciclen (9%), que se abandonen (8%), que se utilicen para la recuperación de energía (12%) o disipados en el medio ambiente, que es la mayoría (71%) (Joseph *et al.*, 2022).

Una vez llegados al medio ambiente, estos plásticos sufren una alteración debido a las condiciones de humedad, fotólisis, abrasión y descomposición mecánica y microbiana, transformando estos plásticos en fragmentos de menor tamaño. En la figura 3 se puede observar los diferentes tamaños de plásticos.

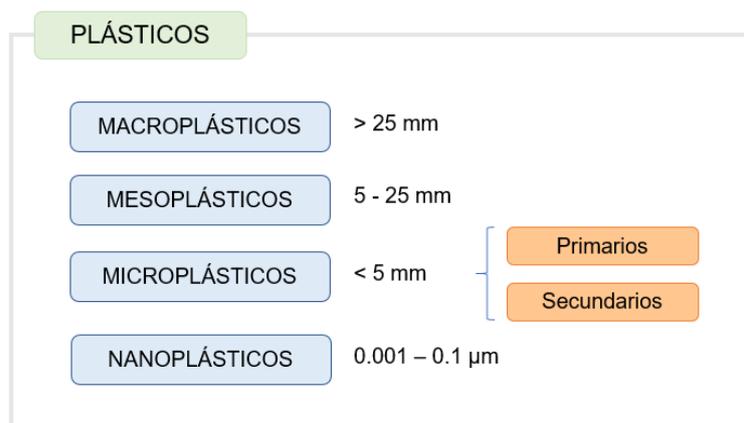


Figura 3. Tamaños de plásticos.

Los macroplásticos son aquellos plásticos que superan los 25 mm de tamaño y se degradan gradualmente en meso plásticos de un tamaño de entre 5 y 25 mm. Estos plásticos se encuentran en las redes pesqueras y en las bolsas de plásticos.

Los microplásticos son aquellos plásticos que se encuentran en un rango de tamaño desde los 5 mm hasta 1 mm. En cuanto a los nanoplásticos, son aquellas que tienen un rango de tamaño desde 0.001 – 0.1 μm . (Alprol *et al.*, 2021).

Estas microesferas se pueden dividir en primarios y secundarios. Los primarios son aquellos que son manufacturados con ese tamaño. Son adicionados a productos del día a día de la población como exfoliantes en cosméticos, detergentes, pastas de dientes, limpiadores faciales o portadores de medicamentos. Los microplásticos secundarios provienen de la degradación de plásticos de más tamaño debido a las condiciones ambientales como exposición a la luz solar, al viento y agua (Ahmed *et al.*, 2022).

Los microplásticos primarios, como se ha mencionado anteriormente, también se disgregan en partículas de menor tamaño debido a la foto, termo o biodegradación,

formando otros microplásticos con tamaños y formas diferentes, como son los gránulos, pellets, fragmentos, microperlas, fibras, espumas (Ahmed *et al.*, 2022), películas, elipses, líneas y copos (Liu *et al.*, 2021). En la tabla 2 se puede observar las formas más abundantes en los diferentes compartimentos ambientales y en los efluentes de agua de las estaciones depuradoras de aguas residuales. Los microplásticos de poliestireno (PS), polietileno (PE) y polipropileno (PP) se utilizan ampliamente en botellas de agua, ropa y envases en la industria agroalimentaria. El poliéster (PER), la poliamida (PA) y Tereftalato de polietileno (PET) se utilizan en la industria textil (Alprol *et al.*, 2021).

Tabla 2. Formas de microplásticos más abundante en diferentes medios (modificada de Mammo *et al.*, 2020).

Localización	MP (formas)
Suelo	Fibra, fragmento, film, pellet, fibra sintética, caucho
Atmosfera	Firma, fibra sintética y natural, fragmento, granulo
Agua dulce	Fibra, pellet, film, fragmento, perla, escamas, espumas, granulo
Marino	Fragmento, film, granulo, fibra, línea, espuma, resina, pellet
Sedimentos fluviales	Fibra, pellet, fragmento, granulo, espera
Sedimentos marinos	Fragmento, fibra, film, esfera
Efluentes de EDAR	Pellet, fragmento, espuma, lamina, granulo, fibra, film, esferas

La composición de estos microplásticos determinará en gran medida sus características fisicoquímicas como la cristalinidad, densidad, superficie química, los aditivos que posean (Alprol *et al.*, 2021) y la posibilidad de poder adsorber contaminantes en su superficie, actuando como vectores de contaminación de los sistemas terrestres. Con respecto a esto último, la capacidad de sorción depende del tipo de polímero, del tamaño, del pH, de la salinidad, la edad del plástico y de la cristalinidad (Mammo *et al.*, 2020). Otro factor a tener en cuenta son los grupos funcionales que se encuentran en la superficie de estas microesferas, dependiendo de la carga que tengan podrán adsorber contaminantes de diferentes naturalezas y variará el efecto tóxico que cause (Kim *et al.*, 2017).

4.2.1. Fuentes de emisión de microplásticos

La identificación de las vías de entrada de este contaminante a los ecosistemas de agua dulce es de vital importancia para poder entender el estado actual de las masas de agua y pudiendo ejercer políticas de gestión de residuos más exigentes y así menguar la presencia de los microplásticos en los ecosistemas acuáticos. Sin embargo, identificarlas no es tarea fácil, ya que pueden ser diversas, pero las principales fuentes incluyen los efluentes de aguas residuales (domésticas, industriales, desbordamiento del alcantarillado), precipitaciones y aguas de escorrentía urbana y agrícola, deposición atmosférica y provenientes de los vertederos, lodos y desechos de alimentos, la pesca deportiva y el turismo. La presencia de estas microesferas en el agua potable es un tema de preocupación por la comunidad científica y se han detectado dos fuentes, una de ellas los efluentes de las estaciones depuradoras de aguas residuales y otra las aguas de escorrentía pluviales y urbanas, pero además se han encontrado microplásticos en productos de consumo humano (Zhao *et al.*, 2022).

En cuanto a las fuentes de emisión de nanoplasticos se debe principalmente a las actividades industriales y a la degradación de sus productos durante su ciclo de vida, como, por ejemplo, la industria farmacéutica, pinturas, productos biomédicos, electrónica, entre otras muchas fuentes (Alprol *et al.*, 2021).

4.2.2. Métodos de muestreo, identificación y cuantificación en las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales

Como se ha mencionado anteriormente, las EDAR actúan como dispersor de contaminación de microplásticos a los sistemas fluviales y terrestres, por tanto, en este apartado se mostrarán diferentes técnicas de muestreo, identificación y cuantificación de microplásticos.

4.2.2.1. Muestreo

La abundancia de microplásticos y la distribución en las EDAR depende de varios factores ambientales como lluvia, velocidad y dirección del viento, además depende

de factores antropogénicos como las actividades que se realicen en la zona de estudio y de la densidad de población (a mayor población, más probabilidad de encontrar microplásticos en el agua). Elkhatib *et al.* (2020) recoge los métodos de recolección de muestra de microplásticos utilizadas en 22 estudios de estaciones depuradoras de aguas residuales, se exponen en la tabla 3.

Tabla 3. Métodos de muestreo de aguas residuales (modificada de Elkhatib *et al.*, 2020).

Muestreo	% de publicaciones	Características
Aleatorio	40%	Muestra tomadas una sola vez y recogidas en contenedores de acero, plástico, vidrio.
Completo	20%	Volúmenes discretos e iguales tomados en intervalos regulares de tiempo.
Bomba de extracción	20%	Se impulsa el agua a través de una bomba y le hace atravesar un tamiz con una luz de poro desde los 20 a 5000 μm . Los volúmenes pueden variar.
Red Neuston/ Red de Plancton	12%	Redes enmarcadas tiradas por una cuerda que recoge los solidos en los primeros 10 cm de la columna de agua. Tamaño de poro de 150 – 330 μm . Parte de los microplásticos no son recogidos. Contaminación por la propia red.
Personalizado	8%	-

Tras este proceso de recogida de muestras, se procesan para separarlos de otras partículas tanto orgánicas como inorgánicas ya que pueden causar interferencias en los métodos de identificación y cuantificación. Se utilizan diferentes métodos como la degradación enzimática oxidativa, que se refiere al uso de enzimas como proteasas, lipasas y celulasas y un tratamiento oxidativo convencional. La digestión química se utiliza para separar las partículas orgánicas de los microplásticos y se utiliza H₂O₂, HCL, HNO₃ y KOH, pero la mejor opción es el agua oxigenada ya que no afecta a los microplásticos (Turan *et al.*, 2021).

4.2.2.2. Identificación y cuantificación

Se puede realizar mediante diferentes técnicas entre ellas técnicas visuales como la microscopía, espectrometría y técnicas térmicas como la cromatografía de gases y espectroscopía de masas o la termogravimetría. En la tabla 4 se puede observar las técnicas con sus ventajas e inconvenientes.

Tabla 4. Técnicas de identificación y cuantificación, ventajas y desventajas (modificada de Turan et al., 2021).

Método de identificación		Ventajas	Inconvenientes
Técnicas visuales	Microscopía	Técnica sencilla, económica y rápida para la identificación de MP con un tamaño de partícula entre 1 y 5 mm	No se puede utilizar de forma independiente para la identificación de microplásticos. Falta de datos sobre la composición química de los microplásticos. El rango de error es mayor cuando decrece el tamaño de partícula.
Espectroscopía	FTIR	No destructivo	Muy caro
		Cantidad mínima de muestra	Laborioso y exigente
		No se requiere preparación previa de la muestra.	Dificultades en el análisis de señales en presencia de contaminantes
		Detecta tamaño de partícula > 10–20 mm	
	Proporciona información sobre la distribución del tamaño de las partículas		
Raman	Capaz de detectar MP con un tamaño de partícula superior a 1 mm	Caro Trabajo lento y laborioso Posible interferencia con otras bandas y fluorescencias de tintes y pigmentos	
Cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC-MS)	Pirólisis, termogravimetrías, y técnicas térmicas.	Sistemas completamente automatizado	Dificultades en la interpretación de datos en muestras complejas
		Capaz de detectar MP independientemente de su tamaño y forma	Destructivo

5. EFECTOS DE LOS MICRO Y NANOPLÁSTICOS

En este apartado se hablará sobre los efectos que causan estos materiales plásticos de reducido tamaño en los ecosistemas y organismos, además de los efectos que causan sobre los procesos llevados a cabo en una estación depuradora de aguas residuales, incidiendo en los reactores biológicos.

5.1. *Efectos en los ecosistemas y organismos*

La presencia de estos contaminantes en todos los ecosistemas de la tierra es un problema de extrema gravedad. La contaminación producida en entornos terrestres se extiende a los medios fluviales acabando en los mares y océanos, influyendo en funciones y procesos biológicos.

Las fuentes de entrada en el sistema terrestre son, vertederos, aguas residuales, compost, riego, escorrentía de calles y precipitación. Los fangos provenientes de las estaciones depuradoras de aguas residuales son una fuente de gran importancia de microplásticos en el suelo ya que se utilizan como enmienda en los campos agrícolas. Por tradición agrícola, es común utilizar cubiertas plásticas en los invernaderos, evitando que las condiciones ambientales adversas acaben con los cultivos, pero con el paso del tiempo estos materiales se degradan y se descomponen en micro y nanoplasticos. Los efectos que producen estos contaminantes en el sistema terrestre son la alteración de las propiedades del suelo, como la disminución de la retención del agua, alteración de la porosidad y de la estructura de los agregados del suelo. Estos contaminantes se pueden acumular en las plantas, siendo una vía de entrada al organismo de los seres vivos que se alimentan de estos. La microbiota de los suelos juegan un papel muy importante en diferentes procesos ambientales como fijación de nitrógeno atmosférico mediante la colonización de las raíces de algunas plantas, además de influir en diferentes propiedades física-químicas del suelo. Los microplásticos causan cambios en la estructura y diversidad de las comunidades microbianas además de generar nuevos hábitats para los microorganismos, pudiendo cambiar las funciones ecológicas de los ecosistemas (Kaur *et al.*, 2021).

Los microplásticos pueden actuar como vector de contaminación aumentando la exposición de los organismos a diferentes sustancias tóxicas como metales pesados y productos orgánicos como pesticidas, productos farmacéuticos y de higiene personal (Atugoda *et al.*, 2020; Fajardo *et al.*, 2019) tanto en suelos como en ambientes acuáticos. Los plásticos llevan aditivos que mejoran las propiedades de estos, pudiendo desprenderse durante su vida útil, normalmente estos productos pueden ser bisfenol A, ftalatos, retardantes de llama, disruptores endocrinos, bioacumulables y extremadamente tóxicos para las bacterias y otros organismos de los suelos y ambientes acuáticos (Hermabessiere *et al.*, 2017).

Los micro y nanoplásticos se introducen en los organismos por vía ingesta, donde sufren una degradación mecánica por los movimientos peristálticos del intestino produciendo daños en estos órganos. Las partículas de menor tamaño son capaces de atravesar el epitelio intestinal y transportarse por el torrente sanguíneo hacia los órganos. Los efectos más comunes son la disminución de la tasa de crecimiento, fecundidad, respuesta inmune mejorada (Alprol *et al.*, 2021). Los efectos pueden estar provocados por los diferentes aditivos que se les añaden a estos para mejorar sus propiedades, lo cual causaría una toxicidad indirecta a los organismos (Hermabessiere *et al.*, 2017). En la tabla 5 se muestran los efectos en diferentes especies acuáticas antes diferentes tipos de plásticos.

Tabla 5. Efectos causados por diferentes tipos de plásticos sobre diversos organismos.

Organismo	Tipo de plástico	Daños	Referencia
Ostras	PS	Disminución del número de folículos y reducción de la movilidad del esperma.	Hermabessiere <i>et al.</i> , 2017
Mejillón azul	Muestra ambiental de MP	Crecimiento anormal y malformaciones.	Jiang <i>et al.</i> , 2020
<i>Dafnia magna</i>	PP, PVC, PET, PUR, PE (alta y baja densidad)	En periodos de entre 24 y 48h provocó la mortalidad del organismo. Ingesta de nanoplásticos produce una falsa plenitud, dejando de comer.	Hermabessiere <i>et al.</i> , 2017 Jiang <i>et al.</i> , 2020
Pez Cebra	PA, PE, PP y PVC	Acumulación de microplásticos en las branquias, en el hígado e intestino, produciendo la inflamación de estos órganos. En los sacos de yema de los embriones se encontraron nanoplásticos, migrando a los órganos y produciendo la muerte de varios individuos y la disminución del ritmo cardíaco en los demás.	Jiang <i>et al.</i> , 2020
<i>Medaka japonés</i>	PES, PP (fibras)	Aumento en la producción de huevos y aneurismas	Jiang <i>et al.</i> , 2020
Ratones	PS	Permanece en el hígado, riñón e intestinos, generando descompensaciones de energía e inflamación de los órganos. Descenso en la producción de moco del intestino y diferencias de composición en la biota intestinal. Daños neurológicos y locomotores.	Jiang <i>et al.</i> , 2020

Al ser consumidas por zooplancton y filtradores, entran en la cadena trófica y se biomagnifican a través de estas, siendo cada vez más alta la concentración de estos en los organismos. Según diferentes estudios, los organismos filtradores son más propensos a ingerir estos micro y nanoplásticos, utilizando los moluscos como indicadores para evaluar la calidad de los ecosistemas (Sousa *et al.*, 2021).

La introducción de este contaminante desde el eslabón más bajo de la cadena trófica podría ser un problema para la salud humana, ya que se consumen alimentos contaminados, además se han detectado microplásticos y nanoplásticos en productos como la sal de mesa, la miel, azúcar, además de en el agua embotellada (Jiang *et al.*, 2020). Estos materiales entran en el organismo mediante la ingestión o la inhalación, los de tamaño $<20 \mu\text{m}$ pueden atravesar la membrana celular pudiendo provocar daños en los sistemas respiratorio y digestivo, además de causar retardo en el crecimiento, daños neurológicos, cambios hormonales y cáncer debido a la presencia de aditivos y sustancias que llevan adsorbidas en su superficie como metales pesados y productos farmacéuticos y de higiene personal (Yaseen *et al.*, 2022) Un estudio de principios de 2021, de Ragusa *et al.* indica que se han encontrado microplásticos de diferentes tamaños y composición en la placenta humana de varias embarazadas con las que se realizó el estudio, sin saber los efectos que podrían causar en los fetos.

5.2. Estaciones depuradoras de aguas residuales

Como se ha mencionado anteriormente las estaciones de aguas residuales actúan como fuente puntual de contaminación de los ecosistemas fluviales, ya que los efluentes de estas estaciones contienen aún una cantidad importante de micro y nanoplásticos.

En las estaciones depuradoras de aguas residuales la entrada de microplásticos tiene diferentes fuentes, en su mayoría recibe el aporte de agua proveniente de actividades domésticas y urbanas, fuentes industriales, carreteras debido al desgaste de los neumáticos de los coches y de la pintura que se aplica en las mismas carreteras. La cantidad de microplásticos que recibirá dependerá de varios factores como la población que habita en la región, el área de captación, el uso del

suelo, las fuentes de aguas residuales y la presencia de redes de alcantarillado (Yaseen *et al.*, 2022).

En Van Do *et al.* (2022) realizan una investigación de la abundancia y composición de los plásticos que ingresan en diferentes estaciones en la ciudad de DaNang (Vietnam). Se observó que en la entrada de las estaciones la cantidad de microplásticos encontrados fueron mayor que en el efluente de estas, ya que durante el proceso del saneamiento la mayor parte de este contaminante fue removida, además que en el efluente los tamaños eran menores por la degradación sufrida en los diferentes tratamientos. Las formas encontradas en este estudio fueron fibras, fragmentos, gránulos, esferas y espumas. El polímero más abundante que se detectó en este estudio fue el PE tanto en el influente como en el efluente, seguido del PET y del PVC.

En el estudio de Edo *et al.* (2020) se muestrearon las aguas de una EDAR cercana a Madrid, que vertía sus aguas al río Henares, afluente del río Tajo, en España. Se observó una gran variedad de tamaños y de colores de estos contaminantes, además de identificarse doce polímeros de plástico entre los efluentes primarios y secundarios, los cuales fueron en su mayoría fibras de PET, poliéter sulfona (PES), PE, Celofán, PP, PUR, PS, PVC, metacrilato de polimetilo y policaprolactona.

En las estaciones depuradoras de aguas residuales, los microplásticos más comunes son las fibras y microperlas, provenientes de actividades domésticas. Las composiciones más frecuentes son PE, PP, PVC, PA/Nylon, PET, PS y Policarbonato (Turan *et al.*, 2021).

Como se puede observar, hay una gran variedad de composiciones tanto en los afluentes como efluentes de las estaciones depuradoras. Si bien es cierto que la mayoría de los tratamientos son capaces de eliminar estos contaminantes del agua residual, siempre queda una fracción que resiste estas barreras y se dispersa en el medioambiente mientras que otra gran parte de estos micro y nanoplásticos permanecen en los lodos de depuradora. Sin embargo, estos materiales generan impactos en las instalaciones y equipos de las estaciones depuradoras, bajando su rendimiento, como se explicará a continuación.

5.2.1. Tratamiento primario

El tratamiento primario comprende a los procesos o conjunto de procesos que tienen la misión de separar por medios físicos y/o químicos las sustancias en suspensión. En esta categoría se incluyen la coagulación-floculación (químico), flotación y filtración.

La coagulación-floculación es un proceso que tiene como objetivo romper la estabilidad de algunas partículas y facilitar la sedimentación de estas, se requiere el uso de reactivos, agentes floculantes, como sulfato de aluminio (III) o sulfato férrico (II) debido a su gran eficiencia de coagulación y su bajo coste. Estos agentes coagulantes se añadirán en una concentración u otra dependiendo de las características del agua residual en cuestión y del pH, donde el sulfato precipitará en hidróxido y atrapará las partículas produciendo flóculos. Los micro y nanoplasticos influyen en este proceso ya que al tener carga superficial negativa interaccionan con los metales de los sulfatos y se necesitará más dosis de agente coagulante para iniciar la reacción en hidróxido (Enfrin *et al.*, 2019).

Otro proceso perteneciente al tratamiento primario es la flotación, el cual, se utiliza eliminar sólidos de baja densidad o partículas líquidas (generalmente aceites) del agua que las contiene. La separación se lleva a cabo introduciendo pequeñas burbujas de gas (normalmente aire). Las burbujas se adhieren a las partículas y la fuerza ascensional que experimenta el consorcio burbuja-partícula (flotantes), hacen que suban hasta la superficie, donde son arrastradas por un rascador superficial. Este proceso es capaz de eliminar del agua residual aceites, grasas y partículas con velocidad de sedimentación pequeña. Hay diferentes configuraciones como la flotación por aire disuelto (DAF), donde se mezcla el agua con aire y este último se solubiliza, de manera repentina al estar a tanta presión se puede despresurizar (vuelve a presión atmosférica) y se forman pequeñas burbujas, perdiendo la solubilidad. Es el método más utilizado y el más eficaz. Debido a la presencia de micro y nanoplasticos del agua residual pueden adsorber contaminantes en su superficie y formar agregados con otras partículas de agua, cambiando su tamaño y densidad, por lo tanto, las burbujas generadas con el

sistema quedan inservibles, ya que no se ajustan a esa densidad (Enfrin *et al.*, 2019).

Los filtros de arena son lechos donde se depositan sólidos en suspensión con un determinado tamaño de partícula y que las partículas al pasar con el agua queden retenidas, son filtros fijos. Se distribuyen en diferentes capas, espesores y partículas de arena, antracita y grava. Hay diferentes tipos, de filtración lenta y de filtración rápida, este último es el más utilizado y eficiente. Elimina partículas sólidas del agua, con el problema de que las primeras capas del lecho se obstruyen y se deben lavar varias veces a la semana. Los micro y nanoplásticos al tener un tamaño reducido son capaces de atravesar la primera capa y llegar al lecho de sílice, siendo adsorbidos en su superficie y bajando el rendimiento de esta capa. A pesar de lavar los filtros, los micro y nanoplásticos establecen enlaces de hidrógeno con la sílice, quedándose retenidos allí (Enfrin *et al.*, 2019).

5.2.2. Tratamiento secundario

Los tratamientos secundarios se refieren a los procesos de tratamiento biológico de aguas residuales, tanto aerobios como anaerobios. Se han reportado estudios donde se observa que la presencia de microplásticos en estos procesos podrían afectar a la eficiencia de eliminación de nitrógeno, de DBO, de oxígeno disuelto, de nitrógeno y fósforo total. Los microplásticos podrían inhibir los procesos de desnitrificación en el tratamiento biológico pudiéndose acumular el amonio (Wu *et al.*, 2021).

5.2.2.1. Reactores aerobios

En el proceso de lodos activos granulares aerobios se observa una disminución en la demanda química de oxígeno (DQO) y del nitrógeno amoniacal total con microplásticos de poliamida (PA), además de poder eliminar los microorganismos del lodo y cambiar su estructura. Con microplásticos de PVC se observó que mejoraba la captación del fósforo por las PAO, pero se inhibía la eliminación de nitrógeno total en estos sistemas, se disminuyó el número de bacterias desnitrificantes ya que se estimularon las bacterias eliminadoras de nitritos. Con la

adición de microplásticos de poliéter sulfona (PES) también se vieron reducidas la eliminación del nitrógeno amoniacal, disminuyó el rendimiento de la nitrito-oxidasa y la tasa de reducción de nitratos, en parte de las poblaciones microbiana se inhibió el contenido de citocromo C. En cuanto a los microplásticos de poliestireno (PS) mejora la desnitrificación debido a la capacidad de adsorción de componentes nitrogenados en la superficie de estos contaminantes (Ali *et al.*, 2021).

En el proceso de lodos activados se observó que la presencia de microplásticos de PP, PVC, PE, PS y PES provocaron la inhibición del proceso de nitrificación y fomentaron la desnitrificación. Los nanoplásticos de poliestireno disminuyen la respiración endógena del lodo y no permitían la correcta sedimentación del lodo. Además, afectan en los procesos de hidrólisis y acidificación, a la vez que mejoraba la metanogénesis en la digestión aerobia de los fangos (Ali *et al.*, 2021)

5.2.2.2. Reactores anaerobios

En el proceso de lodos activos granulares anaerobios, se informó que con respecto a los microplásticos de PET no afectaban a los rendimientos de los lodos, pero sí afectaba en la eliminación de la DQO y bajaba el rendimiento de la producción de metano. Con microplásticos de poliéter sulfona (PES) se redujo la eliminación de la DQO. Los nanoplásticos de poliestireno (PS) reducen el rendimiento de metano y de la eliminación de la DQO, además la adhesión de estos a los microorganismos que forman los lodos provoca efectos tóxicos en ellos por la lixiviación de compuestos como del dodecil sulfato de sodio, que ataca a las enzimas antioxidantes (Ali *et al.*, 2021).

En los procesos de digestión anaerobia se observó que los nanoplásticos se adhieren a *Acetobacteroides hydrogenigenes* provocando la inhibición de su crecimiento y metabolismo. La adsorción de metales pesados como el zinc en microplásticos de poliestireno también afectan en estos mecanismos, inhibiendo la actividad enzimática en los procesos de fermentación y producción de biogás (Fu *et al.*, 2018). Los microplásticos de PET lixivian ftalato de di-n-butilo que provoca la generación de especies reactivas del oxígeno, produciendo muerte celular (Wu *et al.*, 2021). La adición de microplásticos de PVC en esta digestión de los fangos

aumentaría la producción de metano en un primer momento, pero la adición de mayor cantidad inhibiría el proceso debido a la lixiviación de bisfenol A de estos plásticos (Wei *et al.*, 2019).

En los reactores de manta de lodos anaeróbicos granulares de flujo ascendente, más conocidos como UASB se observó una disminución de la producción de metano en presencia de microplásticos de polipropileno (PP), viéndose a su vez afectada la producción de biogás. Puede ser debido a la presencia de antibióticos, metales pesados, contaminantes orgánicos persistentes que se desorben de los microplásticos (Pittura *et al.*, 2021).

De forma adicional, se ha realizado la siguiente tabla resumen (tabla 6) de los efectos que tienen los microplásticos en las diferentes tecnologías de tratamiento del agua descritos anteriormente.

Tabla 6. Resumen de los efectos de los microplásticos en las diferentes tecnologías de tratamiento de agua residual.

Tratamiento		Tecnología	Daños	Referencia
Primario		Coagulación-Floculación	Mayor cantidad a adicionar por la reacción de MP con sulfatos.	Enfrin <i>et al.</i> , 2019
		Filtros Rápidos de Arena	Ensuciamiento irreversible del filtro, enlaces de hidrógenos con la sílice	
		Flotación (DAF)	Disminuye la flotación de las burbujas y los tamaños quedan inservibles	
Secundario	Aerobio	Lodos activos granulares	MP-PA: disminución de eliminación de DQO, Nitrógeno amoniacal. MP-PVC: disminución de la eliminación de nitrógeno total e inhibición de la nitrificación MP-PES: reduce la eliminación de nitrógeno amoniacal, inhibición del Citocromo C. MP-PP, PS, PE: inhibición de la nitrificación	Ali <i>et al.</i> , 2021
		Lodos activos	MP-PP, PS, PE, PVC, PES: inhibición de la nitrificación NP-PS: disminución de la respiración endógena y no sedimentación lodo.	
		Digestión aerobia	NP-PS: afecta a procesos de hidrólisis y acidificación en la digestión aerobia de lodos.	
	Anaerobio	Lodos activos granulares anaerobios	MP-PET: reducción de la eliminación de DQO y producción de metano. MP-PES: reducción de la eliminación de DQO NP-PS: reducción de la eliminación de DQO y producción de metano, muerte microorganismos	Fu <i>et al.</i> , 2018 Wu <i>et al.</i> , 2021 Wei <i>et al.</i> , 2019
		Digestión anaerobia	MP-PS: inhibición del crecimiento celular y metabolismo por la adsorción de metales pesados en <i>Acetobacteroides hydrogenigenes</i> . Reducción de producción de biogás y fermentación. MP-PET: lixiviación compuesto toxico que produce ROS y muerte celular. MP-PVC: lixiviación de BPA y muerte celular.	
		UASB	MP-PP: afectación a la producción de biogás por presencia de contaminantes que producen la muerte celular.	

6. TECNOLOGÍAS DE ELIMINACIÓN DE MICROPLÁSTICOS EN LAS ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES

Las estaciones depuradoras de aguas residuales no están diseñadas para la eliminación de los micro y nanoplásticos, pero los tratamientos que se aplican durante el saneamiento del agua pueden resultar útiles para el retiro de estos. A continuación, se mencionarán diferentes métodos y mecanismos para la eliminación de los microplásticos del agua.

6.1. Físicos

Los tamices, dependiendo del tamaño de malla que posean pueden eliminar tanto micro como nanoplásticos, el problema es que pueden percolar por las pareces y pasar al efluente (Zhang *et al.*, 2020), el mismo problema que tienen la filtración en discos, la cual se componen por diferentes capas o discos con tamaños de poro que permiten retener estos materiales (Xu *et al.*, 2021).

Los filtros de arena rápida son filtros que utilizan arena de cuarzo y antracita como materiales de filtro. Es un mecanismo eficaz de eliminación de microplásticos, pudiendo eliminar un 97% de estos materiales, pero depende de las interacciones hidrofílicas entre los microplásticos y la arena. Sobre la superficie del filtro puede haber microorganismos que adsorban los microplásticos con las sustancias poliméricas extracelulares (Xu *et al.*, 2021). Para mejorar el rendimiento de eliminación se ha combinado con la coagulación (Joseph *et al.*, 2022).

La flotación por aire disuelto (DAF) se puede utilizar como método de eliminación de la fracción más fina de microplásticos por flotación selectiva (Zhang *et al.*, 2020).

La adsorción podría ser un método válido para la eliminación de los microplásticos, en Joseph *et al.*, 2022, se exponen diferentes medios adsorbentes tales como óxido de grafeno y quitina para la adsorción de los microplásticos mediante enlaces de hidrógeno y atracciones electroestáticas. El alginato segregado por las algas y microalgas también sería un buen adsorbente, captando un 94% de los

microplásticos presentes en el agua. El carbón activado granular también es un buen adsorbente capaz de retirar los microplásticos del agua residual. En nanoplasticos, se ha observado que la utilización de fibras de celulosa biodegradables funciona como material adsorbente, eliminando más del 98% de estos, sin embargo, se desorben rápidamente. También se probó la electrodesorción utilizando carbón activado, obteniéndose la eliminación de más del 70% de estos materiales (Ali *et al.*, 2021)

6.2. Químicos

La coagulación permite mediante la adición de coagulantes atrapar los microplásticos en los gránulos, pudiendo alcanzar desde el 47 al 82% de rendimiento de eliminación. Esta coagulación combinada con sedimentación mejora el rendimiento de eliminación. El coagulante que mejor funciona es el sulfato de aluminio (Xu *et al.*, 2021). En cuanto a la eliminación de microplásticos por coagulación, se muestran eficiencias altas utilizando iones Calcio-Aluminio (Ali *et al.*, 2021)

La electrocoagulación es un método efectivo para la eliminación de microplásticos ya que los coagulantes producidos mediante electrodos metálicos tienen más probabilidades de hallar a estos contaminantes, no produciendo tanta cantidad de lodos. Se han utilizado sales de aluminio obteniendo mejores rendimientos de eliminación (Joseph *et al.*, 2022)

En cuanto a los procesos de oxidación avanzada son populares en estaciones depuradoras, estos procesos oxidan los microplásticos, los degradan, pero no los eliminan. La degradación por luz ultravioleta ocurre en la superficie, cambiando su estructura superficial y sus propiedades químicas. Provocan escamas en dichos materiales, generando mayor número de ellos y de reducido tamaño. El cloro es el compuesto más utilizado en la desinfección de las aguas y el que más degrada a los microplásticos, ya que rompe enlaces ya existentes y crea nuevo Cl-C, generando más toxicidad ya que tiene la posibilidad de adsorber nuevos contaminantes (Liu *et al.*, 2021). Con respecto a la fotodegradación, se considera

una buena opción para degradar las partículas de plástico en un tipo reducido, pero los productos de degradación pueden suponer un riesgo para la salud humana y de los ecosistemas (Ali *et al.*, 2021).

Los procesos de electrooxidación también serían una buena alternativa para la eliminación de microplásticos del agua residual, se basan en la generación in situ de radicales oxidantes como los hidroxilos por proceso electroquímico. Además, por lo observado en Kiendrebeogo *et al.* (2021), no se degradaron ni fracturaron durante el proceso, a costa del ensuciamiento del ánodo e interferencias con otros contaminantes asociados a estos.

6.3. *Biológicos*

El proceso biológico de eliminación de microplásticos del agua residual se centra en procesos relacionados con lodos activados (incluye el propio proceso de lodos activados, procesos anaeróbico-anóxico-óxico (A2O), zanjas de oxidación y reactores secuenciales por lotes) y procesos relacionados con biopelículas (incluyen filtros biológicos, lechos fluidizado biológico, reactor biológico de lecho móvil) (Zhang *et al.*, 2020).

El proceso de lodos activados mezcla en un reactor microorganismos y contaminantes que sirven de alimento de estos. Los microorganismos secretan sustancias poliméricas extracelulares que ayudan a captar los microplásticos, adhiriéndose a estos e intentando degradarlos. Esta biodegradación ocurre en cuatro etapas: colonización, biofragmentación, asimilación y mineralización. Pero la degradación que realizan los microorganismos sobre estos materiales es mínima (Joseph *et al.*, 2022). Con lo cual, la eliminación se basa en la retención en los agregados de lodo.

Los procesos relacionados con la formación de biopelículas implican la segregación de sustancias poliméricas extracelulares que ayuda a atrapar los microplásticos en primer momento mediante la adsorción (Zhang *et al.*, 2020). Tras un periodo de tiempo la biopelícula muere y parte de los microplásticos se retienen en ella y otra fracción se libera al agua residual durante el lavado. La fracción que se retiene en

los microorganismos se acumula en los fangos activados residuales, los cuales se llevan a digestores anaerobios para la producción de metano. Al contener microplásticos reducen el rendimiento de la producción de metano por la inhibición de varias rutas metabólicas de las bacterias (Joseph *et al.*, 2022).

Además, existen algunas tecnologías como los biorreactores de membrana (MBR) que son eficaces en la eliminación de los microplásticos del agua residual, se habla del 99% de eficiencia (Liu *et al.*, 2021). Las membranas de estos sistemas normalmente son de micro y ultrafiltración, donde los tamaños de poro corresponden a 0,1 a 50 μm y de 0,001 a 0,1 μm , respectivamente, pudiendo capturar los microplásticos (Zhang *et al.*, 2020).

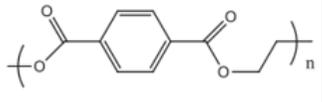
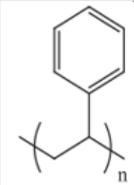
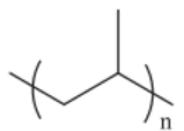
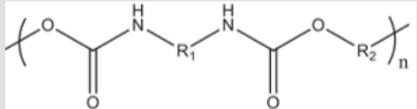
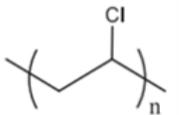
La gran mayoría de los microplásticos acaban en los fangos de depuradora, donde habitan una gran cantidad de microorganismos y bacterias. Algunos de estos organismos son capaces de degradar de manera parcial polímeros de plástico, en Hou *et al.* (2021) se describen varios microorganismos pertenecientes tanto a los fangos de las estaciones depuradoras como del suelo, ya que en ultimo termino, parte de los fangos se estabilizan y se secan para producir fertilizante agrícola.

El PET al tener un anillo alifático es un compuesto recalcitrante y difícil de degradar, algunas enzimas hidrolasas son capaces de romper los enlaces, como lipasas, carboxilasas, cutinasas, esterases entre otras. Cabe destacar a *Ideonella sakaiensis* como bacteria degradadora de PET. En cuanto al PE, debido a su alto peso molecular los tiempos de degradación son largos, pero tanto hongos como bacterias pueden degradarlos. Por ejemplo, el género *Pseudomonas* juega un papel importante en la degradación del polietileno de baja densidad. No hay estudiadas muchas especies que degraden el PP. Con respecto al PS, también es un compuesto recalcitrante, pero muchas bacterias utilizan como fuente de carbono el monómero de estireno, como *Pseudomonas*, *Rhodococcus* y *Nocardia*, entre otros (Hou *et al.*, 2021).

Como se han visto en los anteriores apartados, los micro y nanoplásticos se retiran de las aguas residuales mediante procesos de diferente índole, pero una gran cantidad de estos se retienen en los lodos de depuradora, pudiéndose aplicar estos como fertilizante en la agricultura. En Alvim *et al.* (2021) se estudió la recuperación de microplásticos de los lodos de depuradora mediante la técnica de ultrasonidos.

En la siguiente tabla (tabla 7) se muestran diferentes cepas bacterianas capaces de degradar diversos tipos de polímero de plásticos.

Tabla 7. Tipos de plásticos y microorganismos capaces de degradarlos (modificada de Hou et al., 2021)

Tipo de plástico	Microorganismo	Referencia
PET		<ul style="list-style-type: none"> • <i>Ideonella sakaiensis</i>
PE		<ul style="list-style-type: none"> • <i>Fusarium oxysporum</i> • <i>Pseudomonas sp./ stutzeri</i> • <i>Arthrobacter sp.</i> • <i>Enterobacter asburiae</i> • <i>Bacillus sp.</i> • <i>Brevibacillus sp./ agri/ brevis</i>
PS		<ul style="list-style-type: none"> • <i>Pseudomonas spp.</i> • <i>Bacillus spp.</i> • <i>Rhodococcus ruber</i>
PP		<ul style="list-style-type: none"> • <i>Pseudomonas stutzeri/ azotoformans</i> • <i>Bacillus sp. /subtilis/ flexus</i> • <i>Rhodococcus sp.</i> • <i>Brevibacillus sp./ agri/ brevis</i>
PUR		<ul style="list-style-type: none"> • <i>Pseudomonas fluorescens/ chlororaphis</i> • <i>Delftia acidovorans</i>
PVC		<ul style="list-style-type: none"> • <i>Pseudomonas sp</i>

Hou et al., 2021

6.4. *Eliminación de microplásticos en pequeñas aglomeraciones urbanas: humedales.*

En los subapartados anteriores se han explicado diferentes mecanismos de eliminación de micro y nanoplásticos de las aguas residuales en estaciones depuradoras. Pero en zonas rurales de escasa población y de insuficiente caudal, instalar dichas estaciones no se suele ajustar a las necesidades ni a la economía de estas, por ello, se buscan otras soluciones para poder depurar las aguas antes de verter a cauce, tales como los humedales construidos. Estos humedales construidos son soluciones basadas en la naturaleza utilizadas para la depuración de las aguas en zonas rurales, además de ser utilizadas en el tratamiento terciario de las aguas en algunas estaciones depuradoras.

Los humedales construidos tienen diferentes configuraciones: humedales construidos de flujo superficial y humedales construidos de flujo subterráneo. Además, dependiendo de la dirección del flujo, los de flujo subterráneo se pueden dividir en dos tipos más: humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal y humedales construidos de flujo subterráneo vertical. Los humedales construidos de flujo superficial se utilizan para la eliminación de contaminantes sedimentables, mientras que los de flujo subterráneo, los cuales están en contacto con las aguas residuales, llevan a cabo la retención y adsorción de contaminantes, promoviendo la formación de biopelículas en la matriz de las partículas, aumentando la capacidad de eliminación de contaminantes (Xu *et al.*, 2022).

En Wang *et al.* (2020), se muestrea en una EDAR de una región de Bélgica que da servicio a 450 habitantes equivalentes, cuenta con tratamiento primario, secundario y un humedal construido subsuperficial horizontal, plantado con caña común en sustrato de grava. En el estudio se quiso conocer si dichos humedales servían como barrera ante la contaminación de microplásticos. Los resultados del estudio reflejaron que reducen la concentración de microplásticos evitando que lleguen a cauce los que queden del afluente secundario. Los macroinvertebrados contribuyeron al proceso de eliminación de microplásticos del agua por ingestión, sin generar efectos tóxicos en ellos.

En Wang *et al.* (2021) se realizó un diseño experimental a nivel de laboratorio donde se construyeron diez humedales contruidos de flujo vertical, rellenándolos con una capa de materia orgánica y una capa inferior de grava o arena. En la capa de materia orgánica se adicionaron diversos macroinvertebrados y diferentes composiciones de microplásticos entre los que se encontraron poliestireno, polietileno de baja densidad y polipropileno. Dichos humedales se llenaron con aguas residuales sintéticas y con agua del grifo, no se plantó ninguna especie vegetal. En este estudio se quiso observar el efecto de la formación de biopelículas, del sustrato de relleno y de los macroinvertebrados en la eliminación de microplásticos. Los resultados demostraron que los humedales rellenos con arena tenían mejor eficiencia de filtrado, quedándose los microplásticos en los primeros centímetros de la capa de arena, los cuales se gestionaron como residuo para que no se dispararan de nuevo por el medio. Los sustratos que poseían biopelícula mejoraban el filtrado, reteniendo los microplásticos. Se observó que, a cierta profundidad de la capa de arena, en los excrementos de los macroinvertebrados, se encontraron estas microesferas. A falta de considerar factores ambientales y la presencia de vegetación, se observó que los humedales podían eliminar los microplásticos.

En el estudio de Long *et al.* (2022) se combina la EDAR con los humedales artificiales en las zonas rurales de Changsha (Hunan, China). Utilizan humedales contruidos de flujo subterráneo vertical y humedales artificiales de flujo superficial. Dichos humedales cuentan con vegetación, microorganismos y sustratos de diferente índole como cantos rodados y guijarros. Los resultados de este estudio sugieren que aún hacen falta más avances para la eliminación de los microplásticos del agua residual con estos sistemas.

7. PERSPECTIVAS DE FUTUROS ESTUDIOS

Los micro y nanoplásticos son contaminantes de preocupación emergente que destacan por su ubicuidad en los ecosistemas. A lo largo de la revisión se han reseñado diferentes estudios en los cuales se muestra que dichos materiales, que, a pesar de no saber si los efectos directos o indirectos que causan son debidos a los propios materiales o a los aditivos que se le añaden para mejorar sus propiedades, se han observado impactos negativos en los organismos, ecosistemas y en las diferentes tecnologías de tratamiento de las aguas residuales.

Ante esta problemática se han desarrollado diversas estrategias para su eliminación del agua residual, sin embargo, parte de estos materiales escapan a los ecosistemas por varias vías puesto que las estaciones depuradoras no están diseñadas para eliminar estos residuos, siendo dichas vías de escape los efluentes y los fangos, utilizándose estos últimos como fertilizante en la agricultura. Se deberían mejorar los tratamientos para su eliminación y gestionar el residuo de manera correcta. En caso contrario, se seguirán produciendo efectos adversos.

Como recomendación, se deberían de establecer políticas más restrictivas en cuanto a la producción y eliminación de estos materiales, que se grave a las industrias que los fabrican y utilizan, bien de forma directa o indirecta, siguiendo el principio de "Quién contamina paga".

Como alternativa a los plásticos convencionales se debería de realizar los estudios necesarios para determinar la durabilidad, rentabilidad como material y vías de degradación de los bioplásticos.

8. CONCLUSIONES

La finalidad de esta revisión bibliográfica ha sido identificar la problemática relacionada con la presencia de micro y nanoplásticos en las estaciones depuradoras de aguas residuales, en concreto en los reactores biológicos. A lo largo de este trabajo se han descrito las formas y composición química más relevante de estos materiales que, según las fuentes consultadas, son las fibras y microperlas de PE, PET, PVC, PES, PP, PUR, PS. Estos micro y nanoplásticos llegan a las plantas depuradoras y atraviesan los diferentes tratamientos antes de llegar a los reactores biológicos, causando efectos nocivos tales como la obstrucción, impedimento de sedimentación de sólidos y abrasión de los diferentes filtros.

Se ha observado en diferentes estudios que estos materiales producen efectos nocivos en los reactores biológicos de las estaciones depuradoras; tanto en los aerobios, por inhibición de procesos clave de nitrificación/desnitrificación y eliminación de demanda química de oxígeno; como en procesos de digestión de los lodos en anaerobiosis, lo que produce una disminución en la producción de metano por inhibición de la hidrólisis y acidogénesis, rutas esenciales para dicho proceso. Además, se observó un descenso poblacional de microorganismos metanogénicos como *Acetobacteroides hydrogenigenes*.

Por otra parte, los tratamientos de las estaciones no están preparados para la eliminación de estos materiales, transfiriéndose a los fangos primario y secundario. Los procesos físicos, químicos y biológicos descritos anteriormente los retiran de las aguas a diferencia de los procesos de oxidación avanzada y tratamientos físicos muy agresivos, que disgregan estos materiales en partículas más pequeñas, permitiendo que escapen de estas tecnologías hacia los ecosistemas acuáticos y terrestres.

En suma, sería importante implementar la tecnología adecuada que permitiera la retirada de estos plásticos de pequeño tamaño antes de los tratamientos realizados en la estación depuradora y en el caso de que alguna porción de estos atravesará dichas barreras intentar recuperarlos tras el tratamiento primario y de los fangos

antes de su digestión, llevando a cabo una correcta gestión de los residuos retirados durante todo el proceso.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahmed, R., Hamid, A.K., Krebsbach, S.A., He, J., Wang, D., 2022. Critical review of microplastics removal from the environment. *Chemosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133557>
- Ali, I., Ding, T., Peng, C., Naz, I., Sun, H., Li, J., Liu, J., 2021. Micro- and nanoplastics in wastewater treatment plants: Occurrence, removal, fate, impacts and remediation technologies – A critical review. *Chemical Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130205>
- Alprol, A.E., Gaballah, M.S., Hassaan, M.A., 2021. Micro and Nanoplastics analysis: Focus on their classification, sources, and impacts in marine environment. *Regional Studies in Marine Science* 42. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101625>
- Atugoda, T., Wijesekara, H., Werellagama, D. R. I. B., Jinadasa, KBSN., Bolan, N. S., Vithanage, M., 2020. Adsorptive interaction of antibiotic ciprofloxacin on polyethylene microplastics: Implications for vector transport in water. *Environmental Technology & Innovation*, 19, 100971. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100971>
- Azizi, N., Nasser, S., Nodehi, R.N., Jaafarzadeh, N., Pirsahab, M., 2022. Evaluation of conventional wastewater treatment plants efficiency to remove microplastics in terms of abundance, size, shape, and type: A systematic review and Meta-analysis. *Marine Pollution Bulletin*. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113462>
- Bakaraki Turan, N., Sari Erkan, H., Onkal Engin, G., 2021. Microplastics in wastewater treatment plants: Occurrence, fate and identification. *Process Safety and Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.08.039>
- Bretas Alvim, C., Bes-Piá, M.A., Mendoza-Roca, J.A., 2021. An innovative approach to the application of ultrasounds to remove polyethylene microspheres from activated sludge. *Separation and Purification Technology* 264. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118429>

- Chae, Y., An, Y., 2019. Current research trends on plastic pollution and ecological impacts on the soil ecosystem: A review. *Environmental Pollution*, 240, 387 – 395. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.05.008>
- Coletto, N., 2014. Produzione di biopolimeri da residui dell'industria agro-alimentare. Edo, C., González-Pleiter, M., Leganés, F., Fernández-Piñas, F., Rosal, R., 2020. Fate of microplastics in wastewater treatment plants and their environmental dispersion with effluent and sludge. *Environmental Pollution* 259. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113837>
- Elkhatib D., Oyanedel-Craver, V., 2020. A Critical Review of Extraction and Identification Methods of Microplastics in Wastewater and Drinking Water. *Environmental Science & Technology*, 54, 12, 7037-7049. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06672>
- Enfrin, M., Dumée, L.F., Lee, J., 2019. Nano/microplastics in water and wastewater treatment processes – Origin, impact and potential solutions. *Water Research*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.06.049>
- Fajardo, C., Costa, G., Nande, M., Botías, P., García-Cantalejo, J., Martín, M., 2019. Pb, Cd, and Zn soil contamination: Monitoring functional and structural impacts on the microbiome. *Applied Soil Ecology*, 135, 56 – 64. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.10.022>
- Fu, S.F., Ding, J.N., Zhang, Y., Li, Y.F., Zhu, R., Yuan, X.Z., Zou, H., 2018. Exposure to polystyrene nanoplastic leads to inhibition of anaerobic digestion system. *Science of the Total Environment* 625, 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.158>
- Godoy, V., Blázquez, G., Calero, M., Quesada, L., Martín-Lara, M.A., 2019. The potential of microplastics as carriers of metals. *Environmental Pollution*, 255, 113363. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113363>
- Hartmann, N.B., Hüffer, T., Thompson, R.C., Hassellöv, M., Verschoor, A., Daugaard, A.E., Rist, S., Karlsson, T., Brennholt, N., Cole, M., Herrling, M.P., Hess, M.C., Ivleva, N.P., Lusher, A.L., Wagner, M., 2019. Are We Speaking the Same Language? Recommendations for a Definition and Categorization Framework for Plastic Debris. *Environmental Science and Technology* 53, 1039–1047. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05297>

- Hermabessiere, L., Dehaut, A., Paul-Pont, I., Lacroix, C., Jezequel, R., Soudant, P., Duflos, G., 2017. Occurrence and effects of plastic additives on marine environments and organisms: A review. *Chemosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.096>
- Hou, L., Kumar, D., Yoo, C.G., Gitsov, I., Majumder, E.L.W., 2021. Conversion and removal strategies for microplastics in wastewater treatment plants and landfills. *Chemical Engineering Journal* 406. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126715>
- Jiang, B., Kauffman, A.E., Li, L., McFee, W., Cai, B., Weinstein, J., Lead, J.R., Chatterjee, S., Scott, G.I., Xiao, S., 2020. Health impacts of environmental contamination of micro- And nanoplastics: A review. *Environmental Health and Preventive Medicine*. <https://doi.org/10.1186/s12199-020-00870-9>
- Joseph, A., Naseem, A., Vijayanandan, A., 2022. Microplastics in Wastewater Treatment Plants: Occurrence, Fate and Mitigation Strategies, in: *Energy, Environment, and Sustainability*. Springer Nature, 81–100. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8367-1_5
- KAUR, P., SINGH, K., SINGH, B., 2022. Microplastics in soil: Impacts and microbial diversity and degradation. *Pedosphere* 32, 49–60. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(21\)60060-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60060-7)
- Kiendrebeogo, M., Karimi Estahbanati, M.R., Khosravanipour Mostafazadeh, A., Drogui, P., Tyagi, R.D., 2021. Treatment of microplastics in water by anodic oxidation: A case study for polystyrene. *Environmental Pollution* 269. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116168>
- Liu, W., Zhang, J., Liu, H., Guo, X., Zhang, X., Yao, X., Cao, Z., Zhang, T., 2021. A review of the removal of microplastics in global wastewater treatment plants: Characteristics and mechanisms. *Environment International*. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106277>
- Long, Y., Zhou, Z., Yin, L., Wen, X., Xiao, R., Du, L., Zhu, L., Liu, R., Xu, Q., Li, H., Nan, R., Yan, S., 2022. Microplastics removal and characteristics of constructed wetlands WWTPs in rural area of Changsha, China: A different situation from urban WWTPs. *Science of the Total Environment* 811. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152352>

- Meza Vargas, MF., 2013. Biodegradabilidad de polietileno tereftalato de oxopolietileno, a nivel de laboratorio, por la acción de bacterias nativas presentes en el humus de lombriz, caballo y gallina. Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí.
- Naimatul, W., Muhamad, A.W., Othman, R., Shaharuddin, R.I., Shah, M., Hasni, I., 2015. Ruhul Izzati Shaharuddin, Microorganism as Plastic Biodegradation Agent towards Sustainable Environment, *Advances in Environmental Biology*.
- Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, V., Carnevali, O., Papa, F., Rongioletti, M.C.A., Baiocco, F., Draghi, S., D'Amore, E., Rinaldo, D., Matta, M., Giorgini, E., 2021. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International*.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>
- Sousa, M.C., deCastro, M., Gago, J., Ribeiro, A.S., Des, M., Gómez-Gesteira, J.L., Dias, J.M., Gomez-Gesteira, M., 2021. Modelling the distribution of microplastics released by wastewater treatment plants in Ria de Vigo (NW Iberian Peninsula). *Marine Pollution Bulletin* 166. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112227>
- van Do, M., Le, T.X.T., Vu, N.D., Dang, T.T., 2022. Distribution and occurrence of microplastics in wastewater treatment plants. *Environmental Technology and Innovation* 26. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102286>
- Wang, Q., Zhang, Y., Wangjin, X., Wang, Y., Meng, G., Chen, Y., 2020. The adsorption behavior of metals in aqueous solution by microplastics effected by UV radiation. *Journal of Environmental Sciences*, 87, 272 – 280.
<https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.07.006>
- Wang, Q., Hernández-Crespo, C., Santoni, M., van Hulle, S., Rousseau, D.P.L., 2020. Horizontal subsurface flow constructed wetlands as tertiary treatment: Can they be an efficient barrier for microplastics pollution? *Science of the Total Environment* 721. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137785>
- Wang, Q., Hernández-Crespo, C., Du, B., van Hulle, S.W.H., Rousseau, D.P.L., 2021. Fate and removal of microplastics in unplanted lab-scale vertical flow constructed wetlands. *Science of the Total Environment* 778. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146152>

- Wei, W., Huang, Q.S., Sun, J., Wang, J.Y., Wu, S.L., Ni, B.J., 2019. Polyvinyl Chloride Microplastics Affect Methane Production from the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge through Leaching Toxic Bisphenol-A. *Environmental Science and Technology* 53, 2509–2517. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b07069>
- Wijesekara, H., Bolan, N. S., Brandney, L., Obadamudalige, N., Seshadri, B., Kunhikrishnan, A., Dharmarajan, R., Ok, Y.S., Rinklebe, J., Kirkham, M.B., Vithanage, M., 2018. Trace element dynamics of biosolids-derived microbeads *Chemosphere*, 199, 331 – 339. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.166>
- Wu, M., Tang, W., Wu, S., Liu, H., Yang, C., 2021. Fate and effects of microplastics in wastewater treatment processes. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143902>
- Xu, J., Wang, X., Zhang, Z., Yan, Z., Zhang, Y., 2021. Effects of chronic exposure to different sizes and polymers of microplastics on the characteristics of activated sludge. *Science of the Total Environment* 783. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146954>
- Xu, D., Yin, X., Zhou, S., Jiang, Y., Xi, X., Sun, H., Wang, J., 2022. A review on the remediation of microplastics using constructed wetlands: Bibliometric, co-occurrence, current trends, and future directions. *Chemosphere* 303, 134990. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134990>
- Yaseen, A., Assad, I., Sofi, M.S., Hashmi, M.Z., Bhat, S.U., 2022. A global review of microplastics in wastewater treatment plants: Understanding their occurrence, fate and impact. *Environmental Research* 212, 113258. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113258>
- Zhang, X., Chen, J., Li, J., 2020. The removal of microplastics in the wastewater treatment process and their potential impact on anaerobic digestion due to pollutants association. *Chemosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126360>
- Zhao, M., Cao, Y., Chen, T., Li, H., Tong, Y., Fan, W., Xie, Y., Tao, Y., Zhou, J., 2022. Characteristics and source-pathway of microplastics in freshwater system of China: A review. *Chemosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134192>

Zettler, ER., Mincer, TJ., Amaral-Zettler, LA., 2013. "Life in the "Plastisphere": Microbial Communities on Plastic Marine Debris" *Environmental Science & Technology*, 47 (13), 7137 – 7146.