

Análisis de la Eficiencia de Sistemas de Tratamiento de Agua Potable en la Remoción de
Microplásticos

Katherine Fernández Pinto

Trabajo de Grado para Optar al Título de Especialista en Química Ambiental

Directora

Yaneth Quintero López

Magíster en Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Química

Especialización en Química Ambiental

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A Dios, por darme la fuerza y sabiduría para cumplir una meta más en mi proyecto de vida.

A mi familia, por su paciencia y apoyo incondicional. Ellos me enseñaron y recordaron siempre que por más difícil que sea el camino, con esfuerzo y disciplina, todo se puede lograr.

Agradecimientos

A Dios y a la vida, por darme la oportunidad de seguir formándome profesional y personalmente. Sin su bendición y guía, nada hubiera sido posible.

A mi familia, que me ha dado su amor incondicional, su apoyo constante y su ejemplo de fortaleza. Gracias por estar siempre conmigo, por creer en mí y por enseñarme a ser mejor persona.

A mi novio, por su paciencia, hospitalidad y voz de aliento en los momentos más difíciles.

A mi querida Alma Mater UIS y su escuela de Química, por brindarme la oportunidad de estudiar esta especialización; y por enriquecer mi conocimiento.

A mis profesores, por su dedicación, pasión por la enseñanza y guía en este proceso.

A mis compañeros de especialización, por transmitirme sus conocimientos, por sus anécdotas y buenos momentos. Gracias por su colaboración y apoyo siempre.

A todas las personas que de alguna u otra manera contribuyeron a la realización de este trabajo.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo General	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Marco Teórico	15
2.1 Los Microplásticos	17
2.2 Impacto de los microplásticos en el Agua Potable.....	20
2.3 Plantas de Tratamiento de Agua Potable	23
2.4 Métodos de detección de Microplásticos	24
3. Metodología	26
4. Resultados y Discusión	29
4.1 Tipos, formas y tamaños de microplásticos presentes en las aguas.....	33
4.2 Identificación de los sistemas de tratamiento de agua potable en la remoción de microplásticos	47
4.3 Determinación del sistema de tratamiento de agua potable con mayor eficiencia en la remoción de microplásticos.....	58
5. Conclusiones	60
6. Recomendaciones.....	61
Referencias bibliográficas.....	62

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Ecuaciones de búsqueda</i>	28
Tabla 2 <i>Número de artículos encontrados para cada ecuación de búsqueda</i>	29
Tabla 3 <i>Coautoría por países ecuación 1</i>	30
Tabla 4 <i>Coautoría por países ecuación 2</i>	31
Tabla 5 <i>Polímeros presentes en el afluente y efluente de las PTAP</i>	36
Tabla 6 <i>Presencia y eficiencia de eliminación de MPs en las PTAP</i>	53

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Composiciones químicas de polímeros no biodegradables</i>	15
Figura 2 <i>Niveles de escala o tamaño que se pueden aplicar a los plásticos</i>	18
Figura 3 <i>Fuentes generadoras de contaminación ambiental a través de MPs</i>	19
Figura 4 <i>Rutas de ingreso de Microplásticos a cuerpos acuáticos</i>	20
Figura 5 <i>Rutas de Ingreso al Cuerpo y variedad de impactos de los MPs en los Humanos</i>	22
Figura 6 <i>Métodos de detección de MPs</i>	25
Figura 7 <i>Gráfico de coautoría por países ecuación 1</i>	30
Figura 8 <i>Gráfico de coautoría por países ecuación 2</i>	31
Figura 9 <i>Gráfico de co-ocurrencia ecuación 1</i>	32
Figura 10 <i>Gráfico de co-ocurrencia ecuación 2</i>	32
Figura 11 <i>Diferentes fuentes de contaminación por MPs en productos de uso cotidiano</i>	34
Figura 12 <i>Imágenes de instalaciones de quioscos urbanos de recarga gratuita de agua potable en Ciudad de México</i>	44
Figura 13 <i>Fotografías de microplásticos encontrados en muestras de agua potable tomadas con un microscopio</i>	46
Figura 14 <i>Plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) y red de distribución de MPs</i>	47

Lista de Abreviaturas

ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
EPS	Espuma Expandida
EvOH	Alcohol Vinílico de Etileno
FTIR	Espectroscopia Infrarroja De Fourier
GAC	Carbón Activado Granular
GCMS	Espectrometría de Masas
HDPE	Polietileno de Alta Densidad
LDPE	Polietileno de Baja Densidad
MPs	Microplásticos
NPs	Nanoplásticos
ODS	Objetivo de Desarrollo Sostenible
PA	Poliamida
PC	Policarbonato
PE	Polietileno
PET	Tereftalato de polietileno
PMMA	Polimetilmetacrilato
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PTAP	Planta de Tratamiento de Agua Potable
PTAR	Planta de Tratamiento de Agua Residual
PUR	poliuretano

PVA	Alcohol Polivinílico
PVAc	Acetato de Polivinilo
PVC	Cloruro de Polivinilo
Py-GCMS	Cromatografía de gases
SEM.EDX	Microscopía Electrónica de Barrido con Dispersión de Energía de Rayos X
SRS	Microscopía de dispersión Raman estimulada

Resumen

Título: Análisis de la eficiencia de sistemas de tratamiento de agua potable en la remoción de microplásticos*

Autor: Katherine Fernández Pinto**

Palabras Clave: Microplásticos, Planta de tratamiento de agua potable, Eficiencia de eliminación.

Descripción:

La contaminación por microplásticos (MPs) es un problema emergente que afecta tanto al agua cruda como al agua potable, que es un recurso vital para muchas actividades domésticas. Los MPs son pequeñas partículas de plástico que se originan por diversas actividades y que se detectan en diferentes fuentes de agua potable, como el PET, PP, PS y el PVC, en formas de fibras y fragmentos, principalmente. Estos MPs pueden alterar la calidad del agua y causar problemas de salud, como inflamación, estrés oxidativo, daño celular y genético, alteración endocrina y toxicidad sistémica.

Los sistemas de tratamiento de agua potable, que consisten en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos, pueden reducir la concentración de MPs, pero no pueden eliminarlos por completo. La eficiencia de remoción de MPs depende de factores como el tamaño, la forma, la densidad, el tipo de polímero y la tecnología de tratamiento empleada. Según la revisión bibliográfica realizada, el sistema de tratamiento más eficiente es el que combina pre-ozonización, coagulación-floculación, sedimentación, filtración de arena, ozonización, filtración GAC, UV y cloración, que logra una remoción de MPs superior al 99%. Sin embargo, se necesita más investigación para evaluar la exposición y el riesgo de los MPs, así como para mejorar los procesos de remoción, estandarizar los métodos de análisis y prevenir la contaminación por MPs en el origen.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Especialización en Química Ambiental. Directora: Yaneth Quintero López. Magíster en Química

Abstract

Title: Analysis of the efficiency of drinking water treatment systems in the removal of microplastics*

Author(s): Katherine Fernández Pinto**

Key Words: *Microplastics, Drinking water treatment plant and Removal efficiency.*

Description:

Pollution by microplastics (MPs) is an emerging problem that affects both raw and drinking water, which is a vital resource for many domestic activities. MPs are small plastic particles that originate from various activities and are detected in different sources of drinking water, such as PET, PP, PS and PVC, mainly in forms of fibers and fragments. These MPs can alter the quality of water and cause health problems, such as inflammation, oxidative stress, cellular and genetic damage, endocrine disruption and systemic toxicity.

Drinking water treatment systems, which consist of a series of physical, chemical and biological processes, can reduce the concentration of MPs. However, they can not eliminate them completely. The efficiency of MP removal depends on factors such as size, shape, density, type of polymer and treatment technology employed. According to a literature review, the most efficient treatment system is the one that combines pre-ozonation, coagulation-flocculation, sedimentation, sand filtration, ozonation, GAC filtration, UV and chlorination, which achieves a MP removal of over 99%. Never the less, more research is needed to assess the exposure and risk of MPs, as well as to improve the removal processes, standardize the analysis methods and prevent MP pollution at the source.

* Degree Work

** Science Faculty. Chemistry School. Specialization in Environmental Chemistry. Director: Yaneth Quintero López. Master in Chemistry

Introducción

En las últimas seis décadas, la producción de plástico ha experimentado un notable aumento, alcanzando los 288 millones de toneladas anuales, con proyecciones que sugieren que para el 2050 podría llegar a 33 mil millones de toneladas (Cheng et al., 2021). Este incremento en la producción tiene consecuencias directas en el medio ambiente, dado que más de 8 millones de toneladas de desechos plásticos llegan al mar cada año, y se anticipa un aumento aún mayor para el 2030 (Mehmood et al., 2023).

Las grandes piezas de plástico se descomponen en fragmentos más pequeños debido a la intemperie natural, dando lugar a la producción de microplásticos (MPs), que son partículas con un diámetro inferior a 5 mm (Jung, Y. S. et al., 2022). Los microplásticos se dividen en dos categorías: primarios y secundarios. Los primarios son fabricados intencionalmente en tamaños diminutos para diversas aplicaciones, y los secundarios se generan a partir de la degradación de residuos plásticos por fuerzas externas o la descomposición de partículas más grandes (Cheng et al., 2021).

Los humanos pueden estar expuestos a MPs a través de la inhalación, la ingestión y el contacto dérmico (Na et al., 2021). La utilización de productos plásticos, su persistencia en el medio ambiente y su inadecuada disposición, generan y acumulan microplásticos en océanos, agua dulce, sedimentos, suelo y atmósfera (Sajid, Ihsanullah, Tariq Khan, & Baig, 2023).

Los MPs ingresan al medio acuático por escorrentía de carreteras, efluentes de las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR), descargas domésticas, agricultura, industria, abrasión de productos plásticos más grandes o deposición atmosférica (Cheng et al., 2021). El agua dulce es recurso hídrico primordial para abordar las demandas de la sociedad en ámbitos como: agricultura, industria, generación de energía y consumo humano.

En las Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) se realizan tratamientos químicos (coagulación y floculación) físicos (clarificación, flotación, filtración con carbón activado granular (GAC), filtración por arena y filtración con membrana) y desinfecciones (cloración, ozonización y desinfección ultravioleta) (Cheng et al., 2021). Sin embargo, las PTAP no pueden eliminar los microplásticos con una eficiencia del 100% (Acarer, 2023a) y llegan a los consumidores a través del agua de grifo o agua embotellada (Cherniak et al., 2022).

Los MPs pueden generar consecuencias negativas en la salud humana, afectando el sistema inmunológico, hormonal y reproductivo (Araujo, Nolasco, Ribeiro, & Ribeiro-Claro, 2018). La detección de microplásticos en el agua ha suscitado interrogantes sobre su presencia en los procesos de tratamiento y la eficiencia de las PTAP para eliminarlos (Negrete Velasco, Ramseier Gentile, Zimmermann, Le Coustumer, & Stoll, 2023) lo cual ha sido objeto de numerosos estudios e investigaciones (Dalmau-Soler et al., 2021a; Islam, Islam, Jamal, A. H. M. Shofiul Islam Molla, Momtaz, & Beauty, 2023a; Johnson et al., 2020; Jung, J., Kim, Kim, Jeong, & Lee, 2022a; Na et al., 2021; Negrete Velasco, Ramseier Gentile, Zimmermann, Le Coustumer, & Stoll, 2023; Pivokonsky et al., 2018a; Pivokonský, Pivokonská, Novotná, Čermáková, & Klimtová, 2020; Radityaningrum, Trihadiningrum, Mar'atusholihah, Soedjono, & Herumurti, 2021; Wang, Lin, & Chen, 2020) .

La falta de control y seguimiento gubernamental en muchos países ha llevado a la ausencia de regulaciones para gestionar los microplásticos, y agrega una complejidad a la problemática, ya que la falta de normativas específicas, dificulta la implementación de medidas efectivas para abordar la presencia de este contaminante en el agua (Ma et al., 2019).

Los microplásticos en las aguas generan problemas como los siguientes: (1) Son excelentes portadores de sustancias químicas orgánicas tóxicas debido a su gran área superficial y fuerte

hidrofobicidad. (2) Metales pesados, como Zn, Cu, Pb, Ag, pueden adsorberse en su superficie y (3) El crecimiento de especies acuáticas puede verse afectado debido a la obstrucción parcial del transporte de luz (Ma et al., 2019).

En este contexto, la ingesta de microplásticos a través del agua potable representa una posible vía de exposición, por tanto, es crucial evaluar la eficiencia de las PTAP para reducir la presencia de MPs en el agua, porque no están diseñados específicamente para tratar este contaminante emergente (Barchiesi, Chiavola, Di Marcantonio, & Boni, 2021).

En este sentido, dado que las PTAP tienen el potencial de remover los microplásticos, pero no todos tienen la misma eficiencia en la remoción de estos contaminantes, se requiere realizar una evaluación rigurosa de su eficiencia y proporcionar información útil para mejorarla, proteger la salud pública y el medio ambiente.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar la eficiencia de sistemas de tratamiento de agua potable en la remoción de microplásticos, mediante una revisión bibliográfica.

1.2 Objetivos Específicos

Identificar los tipos de microplásticos presentes en las aguas tratadas.

Identificar los sistemas de tratamiento de agua potable en la remoción de microplásticos.

Determinar el sistema de tratamiento de agua potable con mayor eficiencia en la remoción de microplásticos.

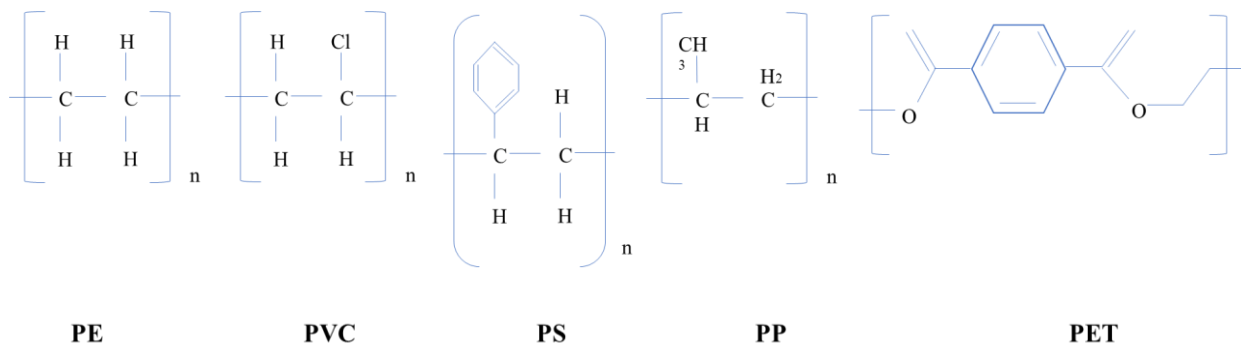
2. Marco Teórico

Es poco probable que se pueda visualizar la existencia en la Tierra sin la incorporación de plásticos en el contexto actual. Debido a su versatilidad, durabilidad y amplias aplicaciones, los plásticos se han vuelto indispensables y omnipresentes en la vida humana, permeando cada aspecto de la sociedad. Los beneficios de los plásticos, como su flexibilidad y resistencia a la luz, los han llevado a ser utilizados en una amplia gama de áreas. Sin embargo, el crecimiento exponencial de la población mundial a lo largo de los años, junto con la urbanización, ha tenido un impacto significativo en el medio ambiente, lo que ha provocado un aumento en la demanda de energía, contaminación, congestión y calentamiento global, que tiene un impacto en los sistemas oceánicos, biológicos y humanos (Kundu et al., 2021).

Los plásticos son compuestos sintéticos derivados de polímeros, que son macromoléculas formadas por la unión de numerosas unidades más pequeñas denominadas monómeros. Según (Kirstein et al., 2021), algunos de los polímeros más comunes son:

Figura 1

Composiciones químicas de polímeros no biodegradables.



Nota: Adaptado de (Kundu et al., 2021) y modificada para efecto de ilustración de esta investigación.

Polietileno (PE): Es el plástico más producido y utilizado en el mundo, con una producción anual de más de 100 millones de toneladas (PlasticsEurope, 2020). Se usa para fabricar bolsas, botellas, envases, tuberías, películas, juguetes, etc. Existen dos tipos principales de PE: el polietileno de baja densidad (LDPE) y el polietileno de alta densidad (HDPE), que se diferencian por su estructura molecular y sus propiedades físicas (Geyer et al., 2017).

Polipropileno (PP): Es el segundo plástico más producido y utilizado en el mundo, con una producción anual de más de 70 millones de toneladas (PlasticsEurope, 2020). Es un plástico versátil y resistente al calor que se usa para fabricar envases de alimentos, tapas, fibras textiles, alfombras, piezas de automóviles, etc. (Geyer et al., 2017).

Poliestireno (PS) y cloruro de polivinilo (PVC): Son plásticos rígidos y transparentes que se usan para fabricar vasos, platos, cubiertos, bandejas, cajas de huevos, tuberías, cables, revestimientos, ventanas, tarjetas de crédito, juguetes, etc. (Geyer et al., 2017). El PS también se usa en forma de espuma expandida (EPS) para el aislamiento térmico y el embalaje protector, mientras que el PVC también se usa en forma de plastisol para recubrir tejidos y otros materiales (Kirstein et al., 2021).

Tereftalato de polietileno (PET) y poliéster: Son tipos de polímeros sintéticos que se utilizan para fabricar botellas, fibras y otros productos. El PET es el plástico más utilizado para las botellas de bebidas, con una producción anual de más de 20 millones de toneladas (PlasticsEurope, 2020). El poliéster es la fibra sintética más utilizada para la fabricación de telas, con una producción anual de más de 50 millones de toneladas (Woodings, 2019).

Poliamida (PA) y poliuretano (PUR): Son plásticos que forman parte de la familia de las fibras sintéticas y los elastómeros, respectivamente. La PA, también conocida como nailon, se usa para fabricar ropa, cuerdas, paracaídas, airbags, filtros, etc. (Woodings, 2019). El PUR, también

conocido como espuma o caucho, se usa para fabricar colchones, almohadas, asientos, zapatos, adhesivos, recubrimientos, etc. (Kirstein et al., 2021).

Polimetilmetacrilato (PMMA): Es un polímetro termoplástico transparente y resistente, usado en la fabricación de láminas, ventanas, lentes, juguetes, productos odontológicos, entre otros (Kirstein et al., 2021).

La categoría de materiales plásticos se divide en dos grupos fundamentales según su reacción al calor: termoestables y termoplásticos. Los termoplásticos se funden a altas temperaturas y se endurecen al enfriarse, poseen buena elasticidad, facilidad de procesado y se pueden reciclar, como el PP, PE, el PET, el PS, el PVC, los policarbonatos y las PA (Menon et al., 2023). Los plásticos termoestables son polímeros con alta resistencia térmica y química, una vez moldeados y endurecidos mediante calor o reacciones químicas, no pueden fundirse ni remodelarse mediante calor adicional, por tanto, no son reciclables, como el PUR, las resinas epoxi, las resinas acrílicas, entre otras. De acuerdo a la producción mundial de plásticos el PE, PP, PVC, PET, PUR y PS, son los plásticos más comunes y representan el 92% del total producido (Menon et al., 2023).

2.1 Los Microplásticos

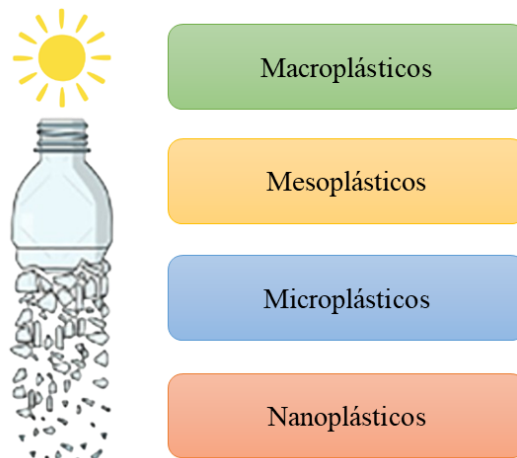
Un análisis de la producción de plástico en Europa estima que la producción, el consumo y la generación de residuos de plástico a nivel mundial superaron los 370 millones de toneladas (Mt) en 2019 (Association of Plastic Manufacturers, 2020). En 2021, la producción mundial de plásticos alcanzó los 390,7 millones de toneladas, lo que representa un incremento del 4,04% en comparación con 2020 (Statista et al, 2021). Los plásticos que contaminan el medio ambiente se clasifican en micro, meso o macro residuos, lo cual se refiere a la categorización según el tamaño de las partículas o fragmentos de plástico (Blettler et al., 2017).

Dado que la descomposición de la contaminación causada por plásticos sintéticos es un proceso lento, las partículas persisten en el entorno acuático durante extensos períodos, siendo accesibles para los individuos marinos. En este medio, la fragmentación del plástico es catalizada por procesos como la biodegradación, fotodegradación, reacciones termooxidativas e hidrolíticas (Mrowiec, 2017), dando lugar a la formación de particular de plásticos más pequeñas, conocidas como Microplásticos (MPs).

Los MPs se caracterizan generalmente por ser partículas de polímero sólidas, insolubles en agua, de un tamaño ≤ 5 mm, y aunque no existe una definición formal para el límite inferior de tamaño, a partículas inferiores a 1 μm suelen denominarse nanoplásticos (NPs), en lugar de MPs (Koelmans et al., 2019) Hasta la fecha, no se ha establecido una categoría estandarizada para la clasificación de MPs, sin embargo, se clasifican según su forma, color y tipo de polímero (Cheng et al., 2021)(Menon et al., 2023).

Figura 2

Niveles de escala o tamaño que se pueden aplicar a los plásticos.



La presencia y dispersión de MPs en el entorno están condicionadas por factores como la temperatura, tamaño, densidad, composición química, morfología del plástico, método de

procesamiento, y carga microbiana. Según se ha documentado, los MPs ingresan al medio ambiente a través de diversas fuentes, incluyendo aguas de escorrentía, emisiones de aguas residuales municipales e industriales, procesos de fragmentación y degradación, así como la deposición atmosférica (Mehmood et al., 2023) (Cheng et al., 2021). La complejidad de estos elementos destaca la necesidad de un análisis integral para comprender la dinámica y los impactos de los MPs en el ecosistema.

Los MPs se clasifican en dos categorías, primarios y secundarios, dependiendo de la forma en que ingresan al medio ambiente. Los MPs primarios son partículas plásticas de tamaño microscópico liberadas directamente en el entorno, como polvos y perlas utilizadas en la industria o productos de cuidado personal. Los MPs secundarios se generan a partir de la fragmentación de materiales plásticos más grandes, como desechos plásticos o fibras sintéticas (Yusuf et al., 2022).

Figura 3

Fuentes generadoras de contaminación ambiental a través de MPs

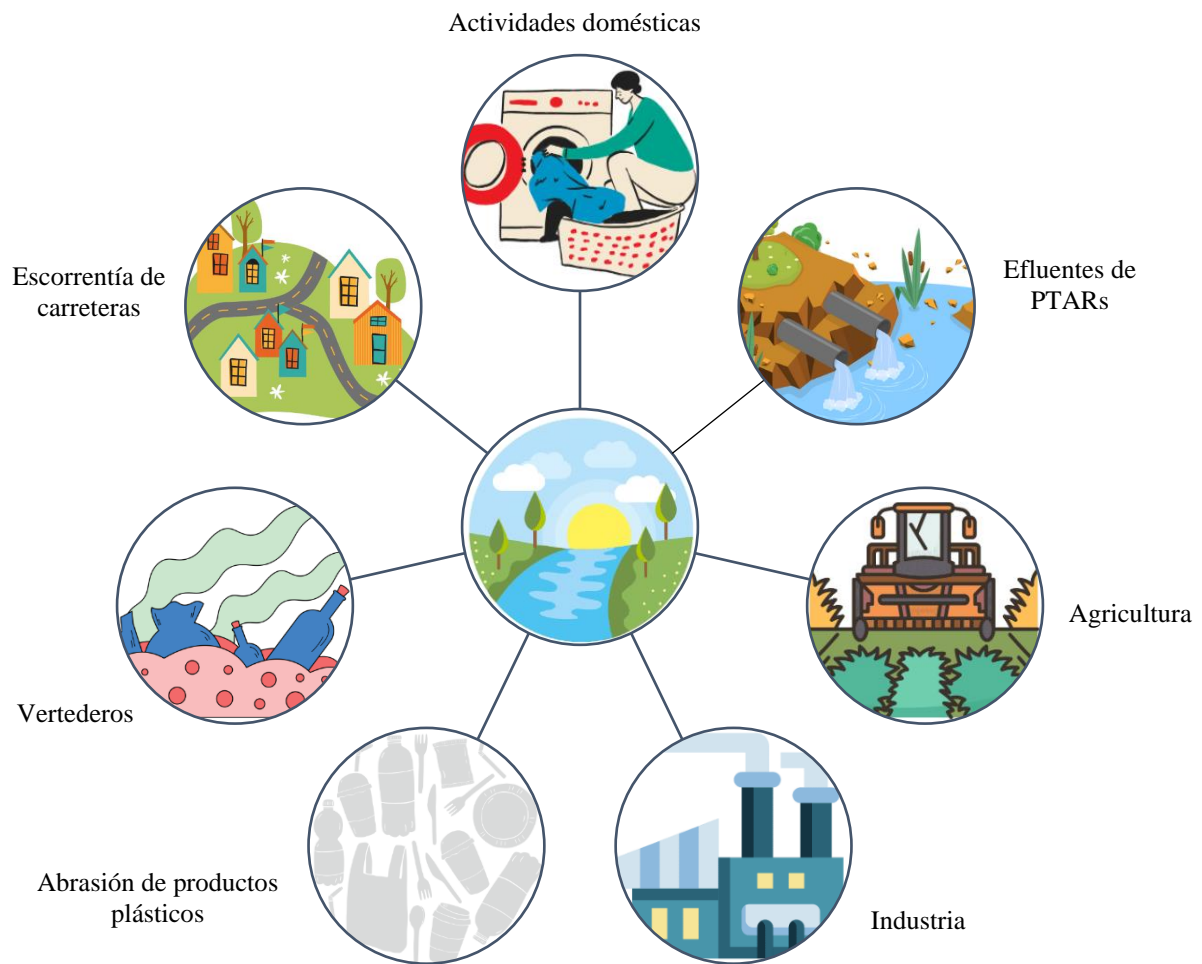


Se estima que la fuente principal de MPs primarios en el medio marino proviene de las aguas de escorrentía de las carreteras (66%) seguida de los efluentes de las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) (25%) (Cheng et al., 2021). En las actividades domésticas (como lavado de ropa y uso de productos de limpieza corporal), la agricultura y la industria, se liberan MPs al

agua, los cuales deben ser removidos en las PTAP, previo a su descarga. Sin embargo, debido al volumen de aguas residuales vertidas por las PTAR, diariamente se liberan entre 15.000 y 4,5 millones de elementos MP a las aguas superficiales, independientemente de la eficacia del tratamiento (Mehmood et al., 2023).

Figura 4

Rutas de ingreso de Microplásticos a cuerpos acuáticos.



2.2 Impacto de los microplásticos en el Agua Potable

Con el incremento en el uso de plásticos por parte de la población, la presencia de microplásticos se ha constatado en diversas ubicaciones, como campos agrícolas, áreas desoladas,

ecosistemas de agua dulce, arroyos, estanques, ríos, zonas costeras, hábitats marinos profundos e incluso en el hielo del Mar Ártico (Menon et al., 2023). De acuerdo con investigaciones llevadas a cabo por National Geographic, se estima que aproximadamente 8 millones de toneladas de desechos plásticos ingresan anualmente a los océanos, siendo transportados por corrientes fluviales y concentrándose especialmente en los principales ríos a nivel global y sus afluentes fundamentales (Mehmood et al., 2023) Si las tendencias actuales persisten, las proyecciones de la ONU indican que para el año 2050, los océanos contendrán más plásticos que peces (Miranda, 2023).

Estudios recientes destacan la presencia de trazas de MP en la cadena alimentaria, es decir, desde los productores hasta los consumidores, encontrándose sus trazas en alimentos (azúcar, miel y sal), bebidas (leche, cerveza y agua potable) y principalmente mariscos (Menon et al., 2023). Lo anterior, puede estar relacionado con la acumulación de los MPs en los organismos vivos y el desplazamiento de la cadena alimentaria a niveles tróficos superiores, incluidos los humanos (Zhou, X. et al., 2021; Qian et al., 2024).

Toxicología de los microplásticos

Los materiales plásticos pueden requerir cientos de años para descomponerse completamente, acumulándose en el entorno hasta alcanzar niveles críticos. Esta acumulación tiene consecuencias como la asfixia de la fauna marina, el deterioro del suelo, la contaminación de las aguas subterráneas, la contribución al cambio climático, y la posibilidad de afectar la salud humana.

Los MPs plantean un desafío significativo en cuanto a su acumulación en células biológicas, debido a su tamaño reducido, que les permite ser transportados por el viento, el agua y otras fuerzas físicas. Factores como su escala microscópica, la ausencia de cambios apreciables en

el sabor de alimentos o bebidas, y su capacidad de absorción celular facilitada por su pequeño tamaño y amplia superficie, contribuyen a la complejidad del problema. La falta de información integral sobre los impactos de los MPs no disminuye la gravedad de su peligro potencial, que incluye daño celular, formación de tumores, infecciones, toxicidad y riesgo de mortalidad (Menon et al., 2023).

Figura 5

Rutas de Ingreso al Cuerpo y variedad de impactos de los MPs en los Humanos.



Nota: Adaptado de (Menon et al., 2023) y modificada para efecto de ilustración de esta investigación.

Evaluar los riesgos asociados a los microplásticos para los seres humanos y el medio ambiente enfrenta un desafío significativo debido a la variabilidad en las propiedades físicas y químicas, así como en la composición y concentración de estas partículas (Koelmans et al., 2019). Los MPs pueden adsorber otros contaminantes, como productos farmacéuticos, metales u compuestos orgánicos, en el agua potable, y su capacidad de adsorción depende de factores como el tipo, tamaño y propiedades superficiales de los MPs, así como del tipo y concentración de contaminantes, y condiciones ambientales como pH, salinidad y temperatura. Aunque estos pueden representar riesgos para la salud humana y animal al ser ingeridos, acumularse en órganos y causar inflamación, estrés oxidativo o alteraciones endocrinas, los efectos exactos y los

mecanismos de toxicidad aún requieren más investigación. Además, existen desafíos para estandarizar los métodos, regulaciones y pautas para la detección y eliminación de MPs en agua potable (Mehmood et al., 2023).

La liberación de MPs en el medio ambiente puede tener efectos negativos tanto en los ecosistemas como en la salud humana; debido a su hidrofobicidad, los MP pueden adsorber contaminantes orgánicos, incluidos los contaminantes orgánicos persistentes y los metales pesados (Jung, J., Kim, Kim, Jeong, & Lee, 2022b). Entre las sustancias que pueden adsorber los MPs se encuentran el diclorodifeniltricloroetano, los bifenilos policlorados y los hidrocarburos aromáticos policíclicos, que pueden entrar en el cuerpo humano por ingestión o inhalación y tener efectos nocivos (Mehmood et al., 2023).

2.3 Plantas de Tratamiento de Agua Potable

Un inadecuado proceso de tratamiento del agua cruda puede afectar la eliminación de los MPs, por lo tanto, es crucial comprender la función de cada operación unitaria. A continuación, se detallan algunos de ellos:

Coagulación-floculación: este proceso implica agregar productos químicos al agua para formar flóculos que capturan partículas suspendidas, como microplásticos. La dosis, el tipo de coagulante, el pH, la turbidez y la temperatura del agua afectan la eficacia de este proceso.

La sedimentación se basa en la separación gravitacional de los flóculos del agua. La velocidad de sedimentación, el tiempo de retención, la profundidad y el diseño del tanque afectan la eficiencia de este procedimiento. Sin embargo, no todos los MP se sedimentan, ya que algunos tienden a flotar debido a su densidad menor que la del agua.

El proceso de filtración implica el paso del agua a través de un material filtrante, como arena, grava, carbón activado o membranas. Los materiales en suspensión se retienen a través de tamizado, adsorción o interacción electrostática. El tamaño de los poros, la presión, el flujo y la frecuencia con la que se limpia el filtro determinan la eficiencia de este método. El material filtrante también puede afectar la calidad del agua porque puede liberar o adsorber otros contaminantes.

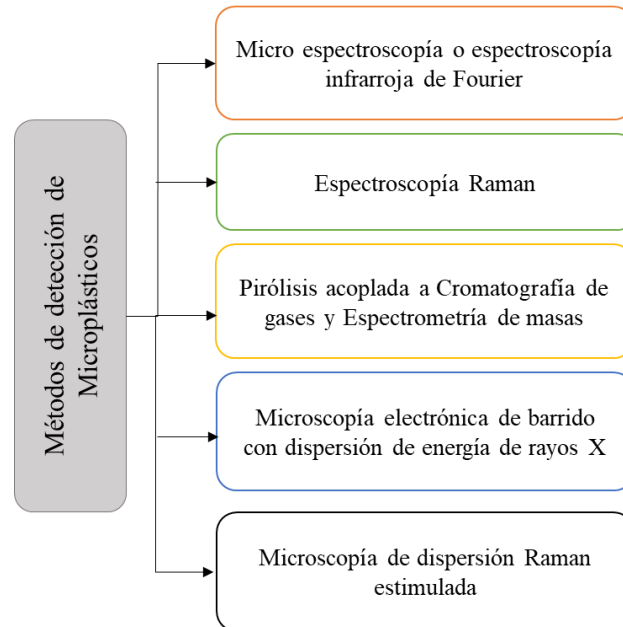
La desinfección es la eliminación o inactivación de microorganismos patógenos mediante el uso de productos químicos o físicos en el agua. La dosis, el tiempo de contacto, el pH y la temperatura del agua determinan la eficacia de este procedimiento. Algunos agentes desinfectantes, como el cloro o el ozono, también pueden oxidar o degradar los materiales en suspensión, reduciéndolos en tamaño o transformándolos en subproductos. Por otro lado, algunos MPs pueden obstaculizar la desinfección al proteger a los microorganismos o reaccionar con los agentes desinfectantes.

2.4 Métodos de detección de Microplásticos

En los últimos años, ha habido una creciente preocupación en torno a los MPs, y científicos de todo el mundo han comenzado a investigar cuántos hay, de qué están hechos y cómo se ven en diferentes entornos utilizando diferentes métodos visuales y analíticos para identificarlos como, por ejemplo: espectroscopia infrarroja de Fourier -FTIR-, Microscopía electrónica de barrido con dispersión de energía de rayos X -SEM.EDX, Pirólisis acoplada a cromatografía de gases y espectrometría de masas -Py-GCMS, Cromatografía de gases - espectrometría de masas -GCMS- o Raman y (Kirstein et al., 2021) y Microscopía de dispersión Raman estimulada (SRS) (Qian et al., 2024).

Figura 6

Métodos de detección de MPs.



FTIR: es una técnica de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier que utiliza un detector de matriz de plano focal para escanear toda el área de las muestras y generar espectros de cada píxel. Esta técnica permite identificar el tipo de polímero, el tamaño, la forma y la masa de los MPs (Kirstein et al., 2021). En otras palabras, se utiliza la radiación infrarroja para detectar las vibraciones moleculares de los polímeros y determinar su composición química, la ventaja de esta técnica es que puede identificar una amplia gama de polímeros, incluyendo los termoplásticos, los termoestables y los elastómeros (Yusuf et al., 2022).

Py-GCMS: es una técnica de pirólisis-cromatografía de gases y espectrometría de masas que consiste en calentar las muestras a altas temperaturas para descomponer los polímeros en fragmentos más pequeños que se pueden separar y analizar por su composición química. Esta técnica permite cuantificar la masa de los MPs y caracterizar los aditivos de los plásticos (Kirstein et al., 2021).

Espectroscopía Raman: es una técnica que utiliza la dispersión inelástica de la luz láser para identificar las bandas características de los polímeros y diferenciarlos entre sí, proporciona información detallada sobre la estructura química, la fase y la polimorfía (Yusuf et al., 2022).

Microscopía electrónica de barrido con dispersión de energía de rayos X (SEM-EDX): Esta técnica combina la visualización de alta resolución de los MPs con el análisis elemental de su superficie mediante rayos X, por tanto, puede proporcionar información morfológica y química de los MPs al mismo tiempo (Yusuf et al., 2022).

Microscopía de dispersión Raman estimulada (SRS): Es un método de espectroscopía vibracional que emplea dos haces láser para amplificar la señal de dispersión Raman en una muestra. La técnica SRS opera al ajustar la diferencia de energía entre ambos haces láser para coincidir con una transición vibracional específica de la muestra, esto provoca una estimulación coherente de las moléculas y una pérdida de intensidad en el haz láser de bombeo. La técnica SRS es altamente efectiva para la obtención de imágenes químicas de alta sensibilidad y especificidad, es utilizada en diversas aplicaciones incluyendo el análisis de muestras biológicas, materiales y nanoplásticos (Qian et al., 2024).

3. Metodología

En la etapa inicial de la investigación, se busca profundizar en los estudios realizados en la última década sobre la presencia de microplásticos en el agua potable y los relacionados con la eliminación de microplásticos en los sistemas de tratamiento de agua para consumo humano. Para llevar a cabo este análisis, se utilizarán las bases de datos gratuitas disponibles en la Universidad Industrial de Santander. En este contexto, Scopus sobresale como la principal fuente de referencia.

Scopus, una base de datos bibliográficos y una herramienta de indexación desarrollada por Elsevier, se empleará para realizar una revisión bibliográfica mediante la exploración de artículos científicos, revistas especializadas, patentes y demás documentos que contiene en su amplio conjunto de información. Esta estrategia facilitará la obtención de un conocimiento detallado y actualizado de la literatura científica relacionada con el tema de investigación.

Con el objetivo de abordar los aspectos clave de la investigación, se proponen términos de búsqueda centrados en palabras clave que abarcan las dimensiones esenciales del fenómeno en estudio. Esta estrategia busca garantizar una cobertura exhaustiva y precisa de la literatura científica disponible.

Las ecuaciones de búsqueda son una forma de expresar las necesidades de información del investigador de una manera que las bases de datos puedan entender y procesar. Se componen de palabras clave, que representan los conceptos principales del tema de interés, y de operadores, que establecen la relación lógica o de proximidad entre las palabras clave. En este caso, se centran en los tres ejes fundamentales de la investigación: “*Microplastics*” “*Drinking water treatment plant*” y “*Removal efficiency*”, con el fin de identificar publicaciones que establezcan una conexión entre la eliminación de MPs en los sistemas de tratamiento de agua potable.

Para ampliar la cobertura en el análisis e integrar de forma lógica los conceptos en la revisión sistemática, se incorpora el uso de conectores booleanos tales como AND y el carácter () en el término “*Drinking water treatment*” y “*Removal efficiency*”, con la intención de abarcar diversas variaciones de este concepto en la búsqueda bibliográfica.

Tabla 1*Ecuaciones de búsqueda*

Ecuación de búsqueda	Estructura
Ecuación 1	(Types Microplastics, drinking water)
Ecuación 2	Microplastics AND (“Drinking water treatment plant” AND “Removal efficiency”)

Además, se restringe a las áreas de interés pertinentes para la investigación, como *Environmental Science, Engineering, Chemistry, Chemical Engineering*.

Luego, se procedió a identificar los documentos relacionados con el tema a través del software VOSviewer, que es una herramienta muy útil para analizar y visualizar las relaciones en conjuntos de datos bibliográficos, lo que facilita la comprensión de la estructura y dinámicas de la investigación científica. Esto incluyó el análisis de los autores más destacados, los países de origen, las palabras clave y cómo se distribuyen a lo largo del tiempo en los años en que fueron publicados, obteniendo los siguientes resultados en cada caso.

Adicionalmente, se realizó un análisis de las conexiones entre las palabras utilizadas en los documentos seleccionados. Este estudio comparó los términos clave asociados con el tema de la investigación, los mencionados por los autores, los usados por las revistas durante el proceso editorial y los años con mayor cantidad de publicaciones, que corresponden a los últimos tres periodos.

A partir de la revisión bibliográfica previa, se buscarán y analizarán los diversos métodos exitosos utilizados en el tratamiento del agua potable para eliminar microplásticos. Se indagará y establecerá con precisión los procesos y tasas de eliminación en cada sistema, con el objetivo de

reconocer los desafíos ambientales relacionados con este tema y proponer acciones específicas que el gobierno nacional podría implementar.

4. Resultados y Discusión

La cantidad total de resultados derivados de ambas ecuaciones de búsqueda se presenta en la Tabla 2 y abarca un período de los últimos ocho (8) años (2015-2023).

Tabla 2

Número de artículos encontrados para cada ecuación de búsqueda

Base de datos	Scopus
Ecuación 1	146
Ecuación 2	34
Total	180

Con respecto a la coautoría entre naciones para la ecuación 1, China destaca como el país con mayor prevalencia en la generación de publicaciones en el ámbito de la investigación y el número de citas recibidas, seguido de Estados Unidos y Alemania. Por otro lado, en la ecuación 2, se listan los países de China, Suiza, España, Canadá e Indonesia.

Como se puede observar en las figuras 1 y 2, así como en las tablas 3 y 4, los países se clasifican de manera detallada de acuerdo con la cantidad de documentos publicados, el número de citas y la fortaleza de las relaciones internacionales que manifiestan. El propósito de lo anterior es aportar una visión más precisa y cuantitativa de la contribución de cada nación en el panorama de investigación sobre la eliminación de microplásticos en los sistemas de tratamiento de aguas potables.

Figura 7

Gráfico de coautoría por países ecuación 1

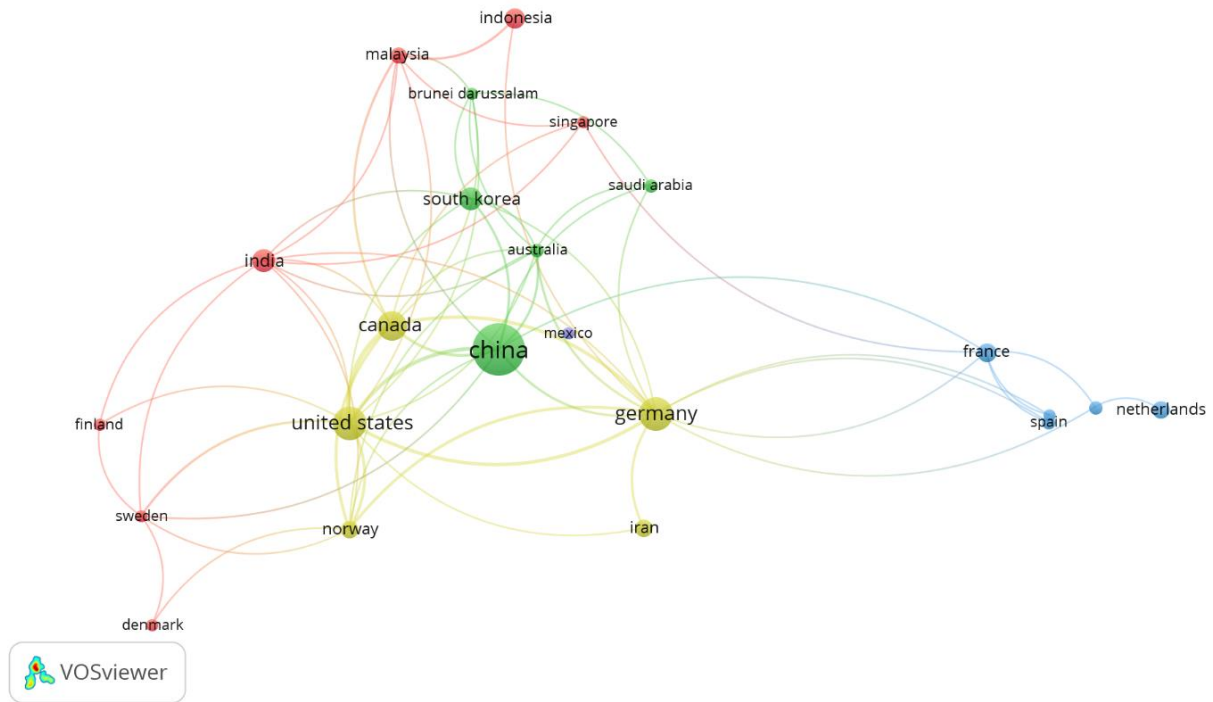


Tabla 3

Coautoría por países ecuación 1

País	Documentos	Citaciones	Fuerza de enlace
China	43	954	19
Estados Unidos	19	595	28
Alemania	19	2160	25
Canadá	15	630	23

Nota: Datos adaptados del software VOSviewer

Figura 8

Gráfico de coautoría por países ecuación 2

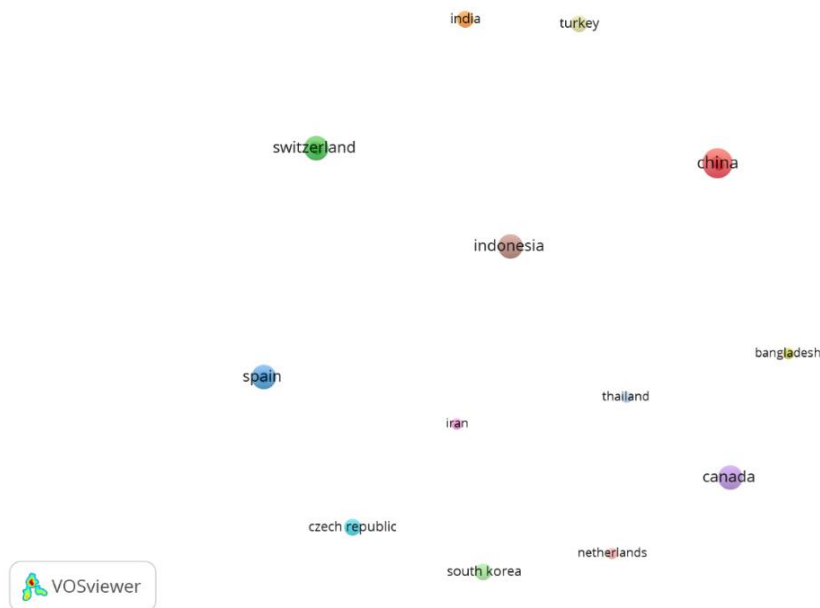


Tabla 4

Coautoría por países ecuación 2

País	Documentos	Citaciones	Fuerza de enlace
China	6	423	2
Suiza	4	55	2
España	4	100	1

Nota: Datos adaptados del software VOSviewer

Como resultado, se observó que en este tiempo hubo más trabajos sobre el asunto de interés, resaltándose expresiones como " Microplastics ", " drinking water" "drinking water treatment plants", "removal efficiencies", que tuvieron la mayor frecuencia de aparición en el texto.

4.1 Tipos, formas y tamaños de microplásticos presentes en las aguas

La contaminación generada por MPs ha surgido como un problema ambiental de alcance global, evidenciando un notable aumento en su presencia en el entorno. Las proyecciones indican que la proporción mundial de MPs en los contaminantes plásticos alcanzará el 13.2% para el año 2060 (Mehmood et al., 2023). Diversos estudios respaldan la afirmación de que los MPs han contaminado suelos, aire y agua, abarcando desde ríos y lagos hasta océanos, con una distribución que abarca todas las latitudes de la Tierra, incluyendo regiones como la Antártida y el Ártico (Mehmood et al., 2023).

Investigar la presencia de MPs en el agua dulce es esencial para proteger la salud de los ecosistemas acuáticos, prevenir la contaminación de fuentes de agua potable, garantizar la seguridad alimentaria y salvaguardar la salud humana en un contexto de desarrollo sostenible. En términos más generales, la búsqueda de soluciones para la gestión sostenible del agua se ha convertido en un punto crucial en la agenda política, reflejándose específicamente en la aspiración de garantizar acceso a agua potable segura y asequible, como establece el sexto Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) (Koelmans et al., 2019). Por lo tanto, se han desarrollado investigaciones sobre la presencia de este contaminante emergente, en aguas pluviales, subterráneas, superficiales y potables (Koelmans et al., 2019).

Aguas pluviales

Las lluvias arrastran los MPs a las aguas superficiales desde fuentes urbanas como las carreteras, las basuras, los suelos, los vertederos y los biosólidos. Los MPs contenidos en estas aguas pluviales provienen principalmente del lavado de las carreteras urbanas, la pintura vial, los productos cosméticos, la ropa sintética, entre otros. Aun cuando la concentración varía según la

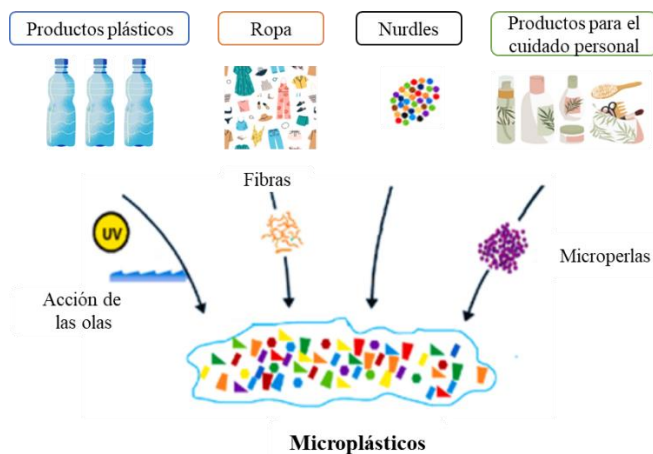
ubicación, el uso del suelo, la urbanización y la técnica de muestreo, los MPs más comunes en este tipo de aguas son el PE, PP, PS, PET y las fibras de poliéster (Mehmood et al., 2023).

Aguas subterráneas, superficiales y potables

Los MPs presentes en el suministro de agua potable provienen de diversas fuentes, tales como las PTAR, el abastecimiento de agua de grifo o los envases de botellas de plástico. Asimismo, estas partículas pueden infiltrarse en las aguas subterráneas a través de distintos medios, como el suelo, los biosólidos o la escorrentía de aguas pluviales. La magnitud y el alcance de este problema se detallan en la Tabla 5, que ofrece información sobre los tipos de MPs encontrados en fuentes de agua alrededor del mundo, el tipo, la forma y el tamaño a la entrada y salida del sistema de tratamiento.

Figura 11

Diferentes fuentes de contaminación por MPs en productos de uso cotidiano.



Nota: Adaptado de (Menon et al., 2023) y modificada para efecto de ilustración de esta investigación.

En primer lugar, las características y la cantidad de MPs en el agua cruda que ingresa a las PTAP varían según factores como la densidad poblacional, las actividades humanas, las

condiciones estacionales, la presencia de residuos plásticos y su grado de fragmentación. Además, la presencia de otras fuentes, como los vertidos de PTAR o el escurrimiento de tierras y carreteras donde se utiliza lodo tratado como fertilizante, lo cual afecta el número total de estas partículas.

En segundo lugar, la detección de los tipos de MPs el agua potable se lleva a cabo mediante métodos como FTIR, espectroscopía Raman o tinción con Nile red. Las concentraciones varían según el tipo de agua, su ubicación y el método de detección utilizado. A pesar de que algunos estudios no han detectado microplásticos en el agua del grifo o en aguas subterráneas, otros informan concentraciones significativas, llegando hasta 9.2 MP/L en agua del grifo y 15.2 MP/L en aguas subterráneas (Mehmood et al., 2023).

En tercer lugar, los datos de la Tabla 5 muestran de manera consistente que los plásticos más abundantes a la entrada y salida son el PET, PP, PS, PVC y PA, tal como han indicado investigaciones anteriores (Barbier et al., 2022; Adib et al., 2021; (Kankanige & Babel, 2021)Mehmood et al., 2023; Sheng et al., 2021). Esta tendencia coincide con la frecuencia de estos plásticos en la fabricación de diversos productos, como bolsas de plástico (PE), artículos de cuidado personal (PE, PP, PET, PVC) y tejidos sintéticos (PA), entre otros. Sin embargo, la presencia de microplásticos en el agua potable sugiere múltiples fuentes. Aunque resulta desafiante determinar con precisión su origen, la identificación de plásticos comunes, como PE, PP y PET, resalta vínculos con diversas actividades humanas. Estos polímeros, comúnmente empleados en envases, son los microplásticos más comunes en fuentes de agua potable a nivel mundial (Sharifi & Movahedian Attar, 2022).

Tabla 5 *Polímeros presentes en el afluente y efluente de las PTAP*

Referencia	Ubicación	Tipo de muestra	Método de cuantificación	Tipos y formas MPs afluente	Tipos y formas MPs efluente	Tamaño MPs afluente (µm)	Tamaño MPs efluente (µm)
(Yang et al., 2023)	París, Francia	Aguas subterráneas	µFTIR	PE, PP, PS Formas irregulares, fibras y fragmentos	PE, PP, PS Formas irregulares, fibras y fragmentos	10-400 Media de 150	10-200 Media de 70
	Bouches-du-Rhône	Aguas superficiales		PE, PP, PS y PET Formas irregulares, fibras y películas	PE, PP, PS y PET Formas irregulares, fibras y películas	10-500 Media de 200	10-300 Media de 100
	Bouches-du-Rhône	Aguas superficiales		PE, PP, PS y PET Formas irregulares, fibras y películas	PE, PP, PS y PET Formas irregulares, fibras y películas	10-500 Media 250	10-400 Media de 150
(Wang, Lin, & Chen, 2020)	China	Río Yangtsé	µ-Raman SEM	PET, PE, PP, PAM, PS, PVC	PET, PAM	1-5 (54,6-58%)	1-5 (84,4-86.7%)
				Fibras, fragmentos, esferas	Fibras, fragmentos, esferas	5-10 (20-27,6%)	5-10 (11,8-16,15)
						10-50 (9,7-12,4%)	
						>50 (15,7%)	

(Sheng et al., 2021)	Changsha, China	Río Xiangjiang	SEM y μ -FTIR	PE, PP, PS, PET	PE, PP, PET, PVC	1-10 (85%)	1-10 (>79%)	
				Fragmentos, fibras y esferas	Fibras, fragmentos	10-50		
						50-100		
						>100		
(Sharifi & Movahedian Attar, 2022)	Irán	Agua superficial	SEM μ -FTIR	PP, PE, PET	PP, PE, PET	<10	<10	
				Fibras y fragmentos	Fibras y fragmentos	10-50	10-50	
						50-100	50-100	
						>100	>100	
(Sarkar et al., 2021)	Calcuta, India	Río Ganges	ATR-IR	PET, PE	PET, PE	<25	<100 (90,91%)	
				Fibras, películas/fragmentos	Fibras, películas/fragmentos	25-50 (36,36%)		
						50-100		<25 (45,45%)
						>100 (81,82%)		
(Pivokonsky et al., 2018b)	Áreas urbanas de República Checa*	Embalse de agua de un gran valle		PET, PP, PS, PVC	PET, PP, PAM			
		Embalse de agua pequeño	Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)	PET, PP, PVC	PAM, PVC, PE	1-5	1-10	
		Río		PET, PE, PP	PET, PP, PAM	5-10	10-50	
				Fragmentos, esferas y fibras	Fragmentos, fibras y esferas	10 - 50		

(Negrete Velasco, Ramseier Gentile, Zimmermann, Le Coustumer, & Stoll, 2023)	Ginebra - Suiza	Lago	Espectroscopia infrarroja con reflectancia total atenuada (ATR) y microscopía óptica	PE, PET, PMMA, PP, PS, PVA, PVC, EVA Fragmentos, películas, gránulos, perlas, espumas y fibras	PE y PVC Fragmentos y películas PET, PP, PS y PVA Fibras sintéticas	63-125	63-125
(Mintenig, Löder, Primpke, & Gerdt, 2019)	Noroccidente de Alemania	Agua subterránea	Análisis microscópico FTIR	Resina epoxi, PEST, PVC Fragmentos y fibras	PVC, PA Fragmentos y fibras	50-150	50-150
(Kirstein et al., 2021)	Suecia	Agua subterránea	μ FTIR y el Py-GCMS	-	Poliéster, PA, acrílico, PVC, PS, PE, PUR, PET Fibras y fragmentos	-	6,6-150 32% era <20
(Kankanige & Babel, 2021)	Tailandia	Río Chao Phraya	Microscopía óptica y de fluorescencia ATR- FTIR, Raman y Tinción con rojo nilo	PE, PP, PET, PA, PVC Fibras, fragmentos, películas, granúlos	PE, PP, PET, PA Fibras, fragmentos, películas, granúlos	6.5-53 53-300 300-500 \geq 500	6.5-53 53-300 300-500 \geq 500
(Jung, J., Kim, Kim, Jeong, & Lee, 2022b)	Busan, Corea del Sur	Río Nakdong Lago	SEM μ FTIR	PE, PP, PET, PMMA, PS, PA Fibras, fragmentos y partículas.	PE, PP, PET, PMMA, PS y PVC- u Fibras y fragmentos	20 – 500 Mayor frecuencia 50-100	20-300 Mayor frecuencia 20-50

(Islam, Islam, Jamal, A. H. M. Shofiul Islam Molla, Momtaz, & Beauty, 2023b)	Bangladesh	Río	Microscopía óptica	PP, PE, PET, PS Fragmentos, fibras	PP, PE, PET, PS Fragmentos	>20	>300
(Dronjak et al., 2022)	Cataluña, España	Río Llobregat	Microscopio óptico y estereoscópico con confirmación final por FTIR.	poliéster, PA, PP, PE, PUR, Poliacrilonitrilo Fibras, fragmentos y películas	Celulosa sintética, poliéster, PA, PP, PE, PUR, poliacrilonitrilo	>20 100-500 más abundante	>20 100-500 más abundante
(Dalmau-Soler et al., 2021b)	Cataluña, España	Río Llobregat	FTIR	poliéster, PP, PE, PS, PA, ABS, PAN Fibras, fragmentos	Poliéster, PP, polisulfona Fibras y fragmentos	500-1000	200-500
(Chu et al., 2022)	Tianjin, China	Río	μ -FTIR	Nylon, Poliester, fluoruro de polivinilideno, PET, PVC, PS, PP Fragmentos y esferas	Poliester, PVC, nylon, PP Fragmentos y fibras.	100-200 (50%) <200 (33,33%) 50-100 (16,67%)	100-200 (66,67%) 50-100 (25%) <50 (8,33%)

(Bäuerlein, Hofman-Caris, Pieke, & ter Laak, 2022)	Países Bajos	Aguas Subterránea	Espectroscopía infrarroja directa de láser (LDIR) y Microscopía	PA, PET, caucho, PE y CPE	PA, PET, caucho, PE y CPE	20-500 y 50-5000	-
		Agua superficial Filtrado de dunas		Fibras, partículas indefinidas, esferas y varillas	Fibras, partículas indefinidas, esferas y varillas		
(Barbier et al., 2022)	París, Francia	Filtrado de ribera	μ -FTIR	PET, PS, PE, PP Fragmentos y fibras	PS, PP, PE Fragmentos	25-100	25-100
		Río Sena		PET, PS, PE, PP Fragmentos	PET, PE, PA, PP Fragmentos	49,5%	75,7%
		Río Marne		PVC Fragmentos	PP, PET, PE, PVC Fragmentos	>100 50,5%	>100 24,3%
(Adib et al., 2021)	Teherán, Irán	Río Karaj	SEM μ -Raman	PP, PET, PE	PP, PET, PS	8,9-11,4	7,1-9,4
		Río Jajrood		Fibras, fragmentos y películas	Fibras, fragmentos y esferas		
		Río Latian					

En el estudio realizado por (Bäuerlein, Hofman-Caris, Pieke, & ter Laak, 2022) se obtuvo que los tipos de MPs más comunes en el agua potable proveniente de diferentes tipos de agua cruda (aguas subterráneas, aguas superficiales, filtrado de dunas y filtrado de ribera) son la PA (33%), PET (15%), el caucho (10%) y el CPE (7%), en forma de fibra, seguido de partículas indefinidas y esferas, con un rango de tamaño entre los 20 a 500 μm en su mayoría.

Asimismo, en la investigación de (Jung, J., Kim, Kim, Jeong, & Lee, 2022b), se constató que el PE y el PP conformaron más del 60% de los microplásticos identificados tanto en el agua cruda como en la tratada. De manera similar, entre el 10% y el 20% estuvo compuesto por PET y polimetilmetacrilato (PMMA), ambos pertenecientes al grupo de poliésteres, los cuales pueden experimentar erosión debido a la exposición a la luz ultravioleta tras haber estado en contacto con el entorno natural (Jung, J., Kim, Kim, Jeong, & Lee, 2022b). Por otro lado (Dronjak et al., 2022), identificó veintidós (22) tipos diferentes de polímeros, siendo la celulosa sintética, el poliéster, la poliamida, el PP, el PE, el poliuretano y el poliacrilonitrilo los más comunes.

En relación a la morfología de los MPs, según (Dronjak et al., 2022), la predominante fue en forma de fibras, seguida de fragmentos y películas. Comportamiento que se mantiene en el resto de las investigaciones, en donde las fibras y fragmentos representan la mayoría de las formas identificadas, independientemente de la ubicación geográfica o el tipo de fuente. Por su parte las fibras se originan por el lavado de ropa sintética, que libera millones de microfibras al agua y al aire, y los fragmentos se forman por la degradación de plásticos grandes por la acción del viento, el sol y la fricción (Acarer, 2023a).

No obstante, otros polímeros, como PVA y EvOH, presentes en el envasado de alimentos y otros productos, también han sido identificados. Además, se han observado polímeros únicos en comparación con investigaciones anteriores, como resinas acrílicas y alquídicas utilizadas en

pinturas sintéticas. La presencia de partículas de pintura, especialmente alquídicas, se concentra en aguas superficiales y sedimentos. En resumen, es probable que la mayoría de los polímeros encontrados provengan de fuentes asociadas con envases, textiles y pinturas (Shruti, Kutralam-Muniasamy, Pérez-Guevara, Roy, & Elizalde-Martínez, 2022).

Adicionalmente, los resultados de las muestras analizadas a la entrada y a la salida de la PTAP en el Noroccidente de Alemania no mostraron diferencias significativas en las concentraciones de MPs detectados en los pasos del tratamiento. No obstante, algunos de los cinco polímeros identificados se usan en la cadena de purificación y suministro de agua potable (PA, PEST). Según (Kirstein et al., 2021) en los sistemas de distribución de una PTAP de Suecia en dos puntos diferentes, se detectaron ocho tipos de polímeros diferentes, siendo el poliéster y la poliamida los más abundantes. La mayoría de los MPs detectados eran menores de 150 μm , y el 32% eran menores de 20 μm . De la misma manera, las plantas de tratamiento de agua potable evaluadas utilizaron una variedad de plásticos en sus tuberías, accesorios y tanques. Es probable que las partículas microplásticas identificadas hayan ingresado debido a la abrasión, y si este fenómeno ocurre con partículas de 50 a 150 μm , puede que sea aún más frecuente para partículas de tamaño más reducido (Mintenig, Löder, Primpke, & Gerdts, 2019). Por tanto, se sugiere realizar más estudios sobre los efectos de los MP pequeños ($<20 \mu\text{m}$) y los aditivos plásticos en el organismo humano (Kirstein et al., 2021).

Agua embotellada

Según la fuente y el proceso de tratamiento, el agua embotellada puede subdividirse en agua de manantial, agua mineral natural y agua tratada. Sin embargo, aun cuando presenta ventajas como el sabor, la pureza, la comodidad y la seguridad, según diversos estudios realizados se ha identificado en ella la presencia de MPs en concentraciones de 2649 MP/L en botellas de plástico

desechables y 6292 MP/L en botellas de vidrio, respectivamente (Zhou, X. et al., 2021). Por ejemplo, en un estudio realizado en china se analizaron 23 marcas de agua embotellada usando microscopía infrarroja por transformada de Fourier y encontraron 215 partículas de microplásticos de 11 tipos de polímeros, con un tamaño que varía de 0,025 a 5,000 μm y una abundancia que oscila entre 2 y 23 partículas por botella (Zhou, X. et al., 2021). Las principales formas de microplásticos fueron fibras y fragmentos, y los principales tipos de polímeros fueron celulosa, PS, PET y PE. Según se informa, las posibles fuentes de contaminación incluyen la fuente de agua cruda, los materiales de embalaje y el proceso de producción.

Adicionalmente, según (Qian et al., 2024), se encontraron datos significativos sobre los MPs y NPs presentes en el agua embotellada. Se observó una concentración media de MPs de $2.4 \pm 1.3 \times 10^5$ partículas por litro de agua, destacando que el 90% de ellas eran nanoplásticos con un tamaño inferior a 1 μm . Se identificaron seis tipos principales, incluyendo PE, PP, PS, PET, policarbonato (PC) y acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), siendo el PE el más predominante, representando el 54% del total de MPs. Respecto al tamaño, se observó una variabilidad que oscila entre 0.1 μm y 10 μm , y un tamaño medio de 0.8 μm para nanoplásticos y 4.2 μm para microplásticos. La forma de los MPs se clasificó en cuatro categorías (esférica, cilíndrica, irregular y fibrilar), siendo la esférica la más común, abarcando el 62% del total, mientras que la forma fibrilar fue la menos frecuente, representando solo el 3% de los MPs (Qian et al., 2024).

Agua de quiosco de recarga

El desarrollo urbano exponencial genera una demanda creciente de agua que supera la tasa de aumento poblacional. En respuesta, han surgido soluciones innovadoras, como la implementación de quioscos de recarga de agua potable, para abordar eficientemente la disparidad en la oferta y demanda hídrica. Los quioscos, ampliamente reconocidos en entornos urbanos, no

solo proveen agua potable al público, sino que también contribuyen a la reducción significativa de residuos plásticos de un solo uso, destacándose como una medida ecoeficiente en el contexto de sostenibilidad ambiental urbana.

Los quioscos de recarga de agua potable se abastecen desde la red de distribución, aplican procesos de tratamiento in situ, envasan el agua, y la ofrecen a través de dos modalidades: el sistema de quiosco de recarga de pago dirigido a clientes y el sistema de quiosco de recarga gratuita para el público en zonas públicas (Shruti, Kutralam-Muniasamy, Pérez-Guevara, Roy, & Elizalde-Martínez, 2022).

Figura 12

Imágenes de instalaciones de quioscos urbanos de recarga gratuita de agua potable en Ciudad de México.



Nota: tomado de (Shruti, Kutralam-Muniasamy, Pérez-Guevara, Roy, & Elizalde-Martínez, 2022).

Desde una perspectiva estructural, estos quioscos se caracterizan por su instalación estratégica y el suministro de agua de calidad en entornos urbanos en desarrollo y áreas rurales con limitado acceso al agua. Su clasificación se realiza en base a si implican o no un costo para los usuarios, lo que permite adaptarse a distintas necesidades y facilita su accesibilidad a diversos sectores de la población.

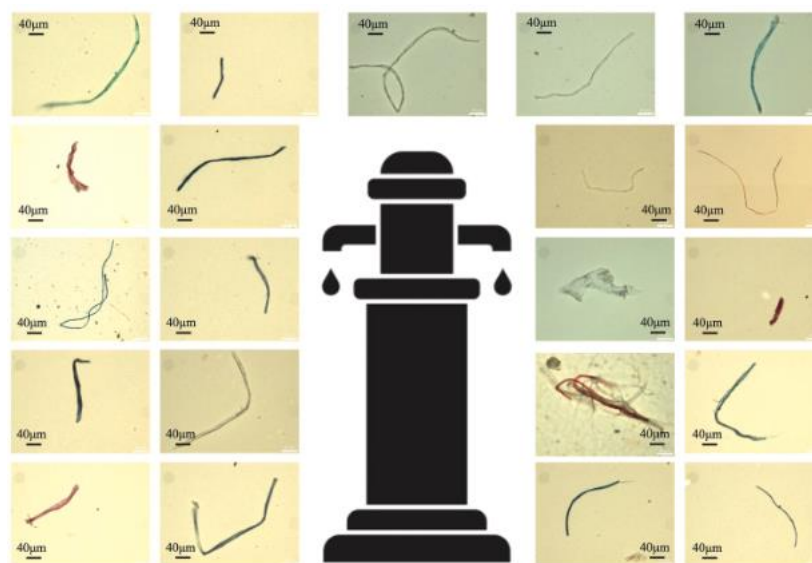
En el estudio realizado por (Shruti, Kutralam-Muniasamy, Pérez-Guevara, Roy, & Elizalde-Martínez, 2022) en la ciudad de México, se detectaron MPs con una concentración media en todas las muestras de $74,18 \pm 48,76$ MP/L, y una variación entre ellas de los $23 \pm 11,31$ MP/L hasta $202 \pm 28,39$ MP/L (Shruti, Kutralam-Muniasamy, Pérez-Guevara, Roy, & Elizalde-Martínez, 2022). Adicionalmente, se identificaron varios tipos de polímeros mediante espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier con reflectancia total atenuada, incluyendo alcohol polivinílico (PVA) (26%), viscosa (17%), PP (14%), polietileno de alta densidad (HDPE) (12%), PET (10%), acetato de polivinilo (PVAc) (8%), alcohol vínico de etileno (EvOH) (6%), acrílico (4%), resina alquídica (3%) (Shruti, Kutralam-Muniasamy, Pérez-Guevara, Roy, & Elizalde-Martínez, 2022).

Los MPs tenían principalmente morfologías de fibras (88%), seguidas de fragmentos (9%) y películas (3%); la mayoría (56%) tenían una longitud inferior a $200 \mu\text{m}$ y predominantemente transparentes (85%), con solo algunos de color (15%; azul, rojo, verde y marrón) (Shruti, Kutralam-Muniasamy, Pérez-Guevara, Roy, & Elizalde-Martínez, 2022). Las principales fuentes de microplásticos de fibra son las actividades antropogénicas en las ciudades y las tareas domésticas. La emisión significativa de fibras microplásticas durante el proceso de lavado de textiles y prendas de vestir sintéticas es un ejemplo. Los microplásticos de forma de película se originan a partir de fragmentos de plásticos más voluminosos (como botellas de bebidas y envases

de comida rápida), mientras que los microplásticos de forma de película se originan a partir de fragmentos de bolsas plásticas y materiales de empaque (Shruti, Kutralam-Muniasamy, Pérez-Guevara, Roy, & Elizalde-Martínez, 2022).

Figura 13

Fotografías de microplásticos encontrados en muestras de agua potable tomadas con un microscopio.



Nota: tomado de (Shruti, Kutralam-Muniasamy, Pérez-Guevara, Roy, & Elizalde-Martínez, 2022).

De acuerdo a las investigaciones realizadas, la presencia de MPs en este tipo de aguas se atribuye a la posible existencia de MP en el efluente de las PTAP o en las aguas subterráneas utilizadas para abastecer el agua, la falta de sistemas de tratamiento de agua que aborden los MP en algunos quioscos, la liberación de MP desde las tuberías de plástico y tanques de almacenamiento de los quioscos, y la liberación de MP debido a la acción mecánica y la tensión durante el llenado, apertura y cierre de las botellas (Acarer, 2023b) (Shruti, Kutralam-Muniasamy, Pérez-Guevara, Roy, & Elizalde-Martínez, 2022). Por tanto, se requieren estudios detallados sobre

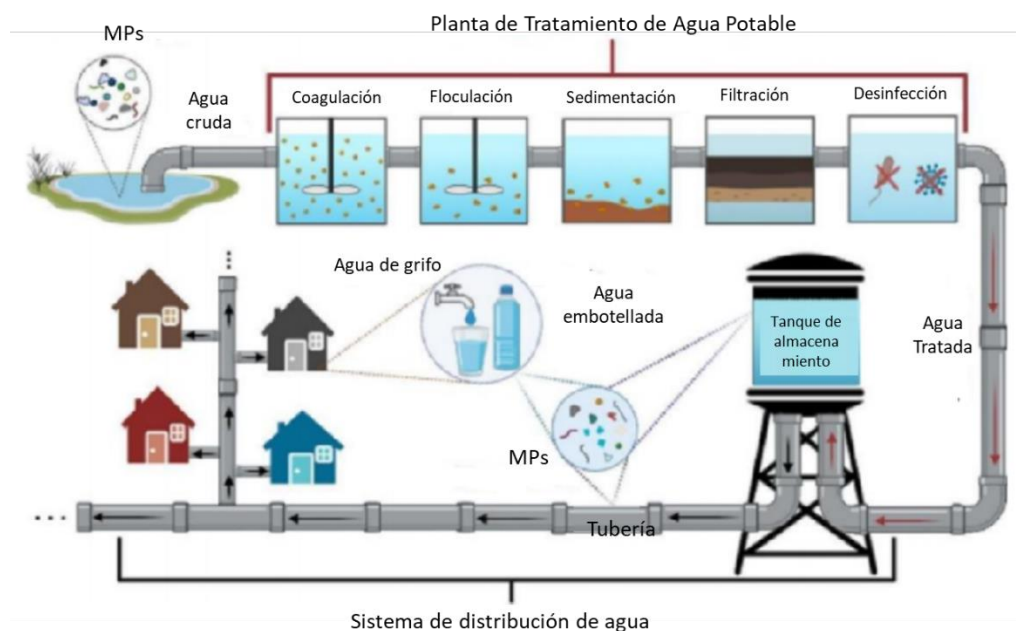
las fuentes de microplásticos en agua de quioscos de recarga para garantizar la calidad del suministro e implementar medidas efectivas de seguridad del agua consumida.

4.2 Identificación de los sistemas de tratamiento de agua potable en la remoción de microplásticos

Considerando que el agua cruda contiene MPs que podrían llegar al grifo de los consumidores, las plantas de tratamiento de agua potable representan la última línea de defensa para evitar esta contaminación. Para abordar la presencia de estas partículas y evaluar la eficiencia de eliminación en las PTAP, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la literatura, abarcando estudios realizados en diversas ubicaciones alrededor del mundo. Los resultados de esta investigación se detallan en la Tabla 6.

Figura 14

Plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) y red de distribución de MPs.



Nota: Adaptado de (Acarer, 2023a) y modificada para efecto de ilustración de esta investigación.

Hasta la fecha, se han realizado escasos estudios que analicen la presencia de microplásticos en las PTAP, sin embargo, se han presentado porcentajes de remoción entre el 29% e incluso >99% (ver tabla 6), las cuales emplean diversos procesos unitarios adaptados al tipo de agua cruda. Estos procesos incluyen tratamientos químicos (coagulación y floculación), físicos (clarificación, flotación, filtración con carbón activado granular -GAC, filtración por arena y filtración con membrana) y desinfecciones (cloración, ozonización y desinfección ultravioleta). Aunque las PTAP no fueron específicamente diseñadas para la eliminación de microplásticos, procesos comunes como la coagulación-floculación y la filtración de arena presentan características que sugieren una posible eficiencia en su remoción (Barbier et al. 2022).

Generalmente, las aguas subterráneas requieren de menor tratamiento en comparación con las aguas superficiales, dado que las concentraciones de MPs pueden variar considerablemente (Barbier et al. 2022). Como resultado, es fundamental comprender las características del agua cruda, el sistema de tratamiento, las variaciones en los métodos de muestreo, la cuantificación y el análisis de MPs, el rango de tamaños cuantificados y la calidad de los experimentos e informes.

Por ejemplo, los análisis que emplean espectroscopia Raman o microscopía electrónica de barrido para examinar partículas de hasta 1 μm encuentran típicamente concentraciones más elevadas de microplásticos en el agua potable en comparación con aquellos que utilizaron técnicas con límites de tamaño más grandes, como la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) o la microscopía óptica, cuyos límites suelen estar entre 20 y 100 μm (Barbier et al. 2022).

La remoción de MPs en las PTAP varía según el proceso unitario y el tipo de MP. Algunos estudios han medido la eficiencia de remoción por cada proceso, y otros por el sistema completo. Por ejemplo, las sales de aluminio son más efectivas que las de hierro para eliminar MPs como el PE y PS en la coagulación, floculación y sedimentación. Sin embargo, estos procesos no eliminan

bien los MPs de menos de 10 μm , porque no se unen a los flóculos ni se sedimentan. (Acarer, 2023a). No obstante, en el estudio realizado por (Wang, Lin, & Chen, 2020), se detectó una gran cantidad de poliacrilamida (PAM) en el efluente de la sedimentación, lo que indica una posible fuente de contaminación por MP debido al uso de coagulantes que contienen PAM.

(Adib et al., (2021) señala que los procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración logran remover entre el 41,2% y el 59% de los MPs, pero no fueron suficientes para eliminarlos completamente, pero en el estudio realizado por (Pivokonsky et al., 2018b) los resultados indican que una parte significativa de los microplásticos fue eliminada por los procesos de tratamiento, es decir, el 70% en la PTAP1, el 81% en la PTAP2 y el 82% en la PTAP3 en promedio. Las disparidades en el porcentaje de remoción de MPs entre la PTAP1, la PTAP2 y la PTAP3 podrían estar vinculadas a las tecnologías de tratamiento empleadas. Mientras que la PTAP1 opera exclusivamente con filtración de arena convencional, las dos últimas plantas de tratamiento funcionan con separación en dos etapas (sedimentación + filtración de arena en la PTAP2, flotación + filtración de arena en la PTAP3), además de contar con filtración adicional con carbón activado granular (Pivokonsky et al., 2018b).

Comportamiento similar al estudio de (Wang, Lin, & Chen, 2020) en donde la coagulación combinada con la sedimentación, tendió a eliminar los MPs en forma de fibras y la filtración de carbón activado granular (GAC), eliminó principalmente los MP de tamaño pequeño (1-5 μm). Sin embargo, la ozonización aumentó la abundancia de MPs de 1-5 μm en el efluente, lo que sugiere un efecto negativo en la eliminación de MPs.

Por otro lado, (Jung, J., Kim, Kim, Jeong, & Lee, 2022b) investigó en las instalaciones de las plantas de tratamiento de Busan, Corea del Sur, en donde los procesos como pre-ozonización, sedimentación y filtración con arena, obtuvieron porcentajes de remoción de MPs en el agua cruda

entre el 99,16% y el 99,70%, lo que significa que solo quedaron entre 0,02 y 0,11 partículas de MPs/L en el agua potable tratada. De igual manera, el estudio indica que los MPs más difíciles de eliminar fueron los de menor tamaño (<20 μm) y los de forma irregular, como el PET y el PMMA, que tienen mayor tendencia a flotar en el agua (Jung, J., Kim, Kim, Jeong, & Lee, 2022b).

Según (Sharifi & Movahedian Attar, 2022) la eficiencia total de eliminación de microplásticos en una planta de tratamiento que incluye coagulación/floculación, clarificación y filtración de arena fue del 83,7%. En esta configuración, la etapa de clarificación y filtración eliminó el 57,7% y el 26,0% del total de microplásticos, respectivamente. Se observó que la eficiencia variaba según el tamaño y la forma de los microplásticos, siendo los de tamaño mayor a 100 μm los más eficientemente eliminados (97,9%), seguidos por los de 50-100 μm (93,9%), 10-50 μm (83,0%) y <10 μm (79,1%). En cuanto a la forma, los microplásticos con forma ovalada mostraron la mayor eficiencia de eliminación (91,4%), seguidos por fragmentos (85,2%), esferas (84,8%) y fibras (80,4%). Conclusión análoga a la obtenida por (Dalmau-Soler et al., 2021b) en donde se detectaron microplásticos en el agua superficial del río Llobregat, con una concentración media de 1,60 MP/L y proceso de tratamiento eliminó el $93 \pm 5\%$ de los microplásticos, siendo la filtración de arena el paso más eficaz (Dalmau-Soler et al., 2021b) Incluso en la planta de tratamiento de agua potable con sistema de clarificación de pulsos se elimina el 85% de los microplásticos presentes en el agua cruda del río Ganges; la mayor parte de la eliminación de microplásticos se produjo en las etapas de clarificación por pulsos y filtración de arena, que redujeron la turbidez, el fosfato y el nitrato del agua (Sarkar et al., 2021).

Conforme a la eliminación por tipo de microplástico, se observó que el polietileno tereftalato (PET) fue el más eficientemente eliminado, con una eficacia del 90,2%. Le siguieron el polipropileno (PP) con un 86,4%, el polietileno (PE) con un 83,7%, el policloruro de vinilo (PVC)

con un 67,4% y el nailon 6 con un 75,5%. Estos resultados ofrecen información valiosa sobre la efectividad de distintas etapas de tratamiento y la selectividad en la eliminación de microplásticos con características diversas en una planta de tratamiento de agua potable (Sharifi & Movahedian Attar, 2022).

De acuerdo a (Barbier et al., 2022), los procesos de tratamiento compuestos por Cribado, coagulación-floculación, sedimentación, filtración de arena, ozonización, filtración de carbón activado granular (GAC), tratamiento UV y cloración, lograron un porcentaje de remoción de MP superior al 90%, siendo el PET el polímero más difícil de eliminar, pero en el estudio realizado por (Dronjak et al., 2022), en una planta de tratamiento de agua potable cercana a Barcelona, Cataluña, en el noreste de España, compuesto por las etapas de pretratamiento, clarificación, oxidación, filtración, microfiltración y electrodiálisis reversible y desinfección, se encontraron MPs con concentraciones que variaban desde $4,23 \pm 1,26$ MPs/L en el afluente hasta $0,075 \pm 0,019$ MPs/L en el efluente, con una eficiencia global de eliminación de la planta fue del 98,3%.

Por otro parte, la planta de tratamiento de agua potable con sistema de clarificación de pulsos eliminó el 85% de los microplásticos del agua cruda del río Ganges, principalmente en las etapas de clarificación por pulsos y filtración de arena.(Sarkar et al., 2021), sin embargo, la época en la que se realiza el estudio parece influir en el resultado, por ejemplo, la eficiencia de eliminación media de la WTP fue del 67.6 % y del 57.2 % en las temporadas seca y lluviosa, respectivamente. La eficiencia de eliminación aumentó con el tamaño de partícula, siendo la más alta para los MPs de $>500 \mu\text{m}$ (80.2 % y 65.7 %) y la más baja para los MPs de $6.5\text{--}53 \mu\text{m}$ (60.0 % y 46.9 %). La clarificación y la filtración contribuyeron a la eliminación de MPs, siendo más efectivas para los MPs de menor y mayor tamaño, respectivamente (Kankanige & Babel, 2021).

Ahora bien, en relación con los estudios realizados a las aguas potables de los sectores rurales, un estudio sobre el sistema de agua potable rural de Chongqing, China, reveló que los microplásticos se encontraban tanto en la fuente como en el grifo. Aunque la planta de tratamiento de agua potable rural logró eliminar todos los microplásticos del agua cruda ($>1000 \mu\text{m}$), la tubería de plástico los reintrodujo en el sistema de distribución. Esto implica que los residentes rurales podrían consumir hasta 1034 microplásticos al año si beben 2 litros de agua del grifo diariamente (Zhou, G. et al., 2023).

Adicionalmente, en un estudio realizado en tres plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) encontró que los MPs estaban presentes tanto en el agua cruda como en el agua tratada, con una concentración media de 0,01 MP/L. Los MPs identificados eran principalmente de polipropileno, polietileno, poliéster y poliestireno, con formas de fragmentos y fibras. Además, las superficies de los MPs estaban contaminadas con metales pesados como Pb, Cd, Cr, As, Cu y Zn, que pueden tener efectos tóxicos en la salud humana y el medio ambiente (Islam, Islam, Jamal, A. H. M. Shofiul Islam Molla, Momtaz, & Beauty, 2023b).

Los procesos convencionales de tratamiento de agua potable lograron eliminar el 99 % de los MPs, siendo más eficaces para los de mayor tamaño ($20 \mu\text{m}$ a $<5000 \mu\text{m}$). Sin embargo, no pudieron eliminar los metales pesados adsorbidos en los MPs, lo que representa un riesgo potencial para el agua tratada. Por lo tanto, se requiere una mayor investigación sobre los efectos toxicológicos de los MPs y los metales pesados asociados, así como la adopción de tecnologías de vanguardia para mejorar la eliminación de los MPs, como la filtración por membrana, la ósmosis inversa, la oxidación avanzada, la irradiación gamma y la separación basada en nanomateriales. Estas medidas podrían contribuir a superar el problema emergente de la contaminación por MPs en el agua potable (Islam, Islam, Jamal, A. H. M. Shofiul Islam Molla, Momtaz, & Beauty, 2023b).

Tabla 6 Presencia y eficiencia de eliminación de MPs en las PTAP

Referencia	Ubicación	Tipo de muestra	Método de cuantificación	Sistema de Tratamiento	Tamaño de partícula (µm)	Abundancia afluyente (MP/L)	Abundancia efluente (MP/L)	Eficiencia de eliminación (%)
(Adib et al., 2021)	Teherán, Irán	Río Karaj				2808	1401	50,11
		Río Jajrood	SEM µ-Raman	Cribado, coagulación, floculación, filtración de arena y desinfección	>1	1996	1042	48,4
		Río Latian				2172	971	55,2
(Barbier et al., 2022)	París, Francia	Río Sena		Cribado, coagulación-floculación, sedimentación, filtración de arena, ozonización, filtración de carbón activado granular (GAC), tratamiento UV y cloración.		11,4 – 22,5	0,002 – 0,022	99,9
		Río Marne	µ-FTIR		>25	32,4 – 45	0,008 – 0,260	99,9
		Río Oise		Nota: La planta Oise, tiene una línea adicional: coagulación-floculación, filtración bicapa de arena y antracita, micro filtración y nanofiltración		7,8 – 17,8	0,012 – 0,09	99,8

(Chu et al., 2022)	Tianjin, China	Río	μ -FTIR	Coagulación-sedimentación y filtración por membrana	<50	134,79	95,63	29,05
(Dalmau-Soler et al., 2021b)	Cataluña, España	Río Llobregat	FTIR	Pre-desinfección, coagulación/flotación, filtración, filtración de arena y cámara de mezcla. Posteriormente líneas paralelas: 1. Ozonización y filtración con GAC 2. Ultrafiltración y ósmosis inversa	>50	0,96	0,06	93,75
(Dronjak et al., 2022)	Cataluña, España	Río Llobregat	Microscopio óptico y estereoscópico o con confirmación final por FTIR.	Cribado, preoxidación, cámara de mezcla, coagulación-floculación, clarificación, filtración de arena, filtración GAC, microfiltración y electrodiálisis reversible	>20	4,23	0,075	98,23
(Islam, Islam, Jamal, A. H. M. Shofiul Islam Molla,	Bangladesh	Río Shitalakshya	Microscopía óptica	Clarificadores Pulsator o Pulsatube, Coagulación-floculación,	>20	25,7	0,3	98,83
		Río				26,01	0,4	98,46

Momtaz, & Beauty, 2023b)		Río		sedimentación, filtración con arena, cloración		6,2	0,05	99,19
(Jung, J., Kim, Kim, Jeong, & Lee, 2022b)	Busan, Corea del Sur	Río	μ-FTIR	Pre-ozonización, coagulación, sedimentación y filtración de arena	>20	2,65	0,01	99,62
		Río		2,48		0,01	99,6	
		Lago		2,46		0,02	99,2	
(Kankanige & Babel, 2021)	Tailandia	Río Chao Phraya	Microscopía óptica y de fluorescencia ATR- FTIR, Raman y Tinción con rojo nilo	Cribado, clarificación (coagulación+floculación y sedimentación), filtración de doble medio (arena rápida/carbón de antracita) y cloración	>6,5	1385 Temporada seca	448,7 Temporada seca	67,60
						1796,6 Temporada de lluvias	769,4 Temporada de lluvias	57,19
(Negrete Velasco, Ramseier Gentile, Zimmerman, Le Coustumer, & Stoll, 2023)	Ginebra - Suiza	Lago	Espectroscopia infrarroja con reflectancia total atenuada (ATR) y microscopía óptica	Pretratamiento, coagulación, filtración de arena, ozonización, filtración de carbón activado granular (GAC) y desinfección	>63	0,038	0,002	94,73
(Pivokonsky et al., 2018b)	Áreas urbanas de	Embalse de agua de un gran valle		Coagulación/floculación y filtración por arena		1473	443	69,93
		Embalse de agua pequeño	SEM	Coagulación/floculación, sedimentación y filtración por arena y	>1	1812	338	81,35

	República Checa*			carbón activado granular				
		Río		Coagulación-floculación, flotación, filtración por arena y por carbón activado granular		3605	628	82,58
(Sarkar et al., 2021)	Calcuta, India	Río Ganges	ATR FT-IR	Pre-desinfección, coagulación, floculación, clarificación por pulsos, filtración de arena, desinfección	<25	17,88	2,75	84,61
(Sharifi & Movahedian Attar, 2022)	Irán	Agua superficial	SEM μ -FTIR	Coagulación-floculación, clarificación y filtración por arena	<10	1597,7	260,5	83,69
(Sheng et al., 2021)	Changsha, China	Río Xiangjiang	SEM y μ -FTIR	Pretratamiento, aireación, coagulación, sedimentación, filtración de arena y carbón activado, desinfección	>1	2753	351,9	87,21
(Wang, Lin, & Chen, 2020)	China	Río Yangtsé	μ -Raman SEM	Coagulación/floculación, sedimentación, filtración de arena, ozonización combinada con la filtración GAC	>1	6614	930	85,94

(Zhou, G. et al., 2023)	Chongqing, China	Embalse rural	Microscopía óptica FTIR	Coagulación-sedimentación, filtración de arena-GAC, ultrafiltración	>1000	-	1,4	100%
--------------------------------	------------------	---------------	----------------------------	---	-------	---	-----	------

4.3 Determinación del sistema de tratamiento de agua potable con mayor eficiencia en la remoción de microplásticos.

A partir de la revisión bibliográfica realizada, la eficiencia en la eliminación de microplásticos en las plantas de tratamiento de agua potable varía debido a distintas tecnologías de tratamiento y condiciones operativas. Además, las diferencias en la cantidad y propiedades (como tamaño, forma y tipo de polímero) de los microplásticos que ingresan a estas plantas también afectan dicha eficiencia. En resumen, aun cuando se utilicen tecnologías similares en diferentes plantas, la eficiencia de eliminación puede variar debido a las disparidades en la cantidad y características de los microplásticos en las respectivas entradas (Acarer, 2023a).

Algunos estudios señalan que las características del tamaño y la densidad de los MPs son fundamentales para su eliminación. Se plantea que los procesos de filtración por membrana son más efectivos que los métodos convencionales, ya que poseen umbrales de tamaño de partícula más bajos, lo que resulta en una retención más efectiva de los MPs (Acarer, 2023a). Estos procesos también muestran una mayor afinidad con los microplásticos al retener partículas de mayor tamaño y densidad que el agua circundante, según (Barbier et al., 2022). Además, los procedimientos de micro y nanofiltración no solo reducen la dureza del agua, sino que también eliminan el dióxido de carbono disuelto, lo que puede afectar positivamente la solubilidad o movilidad de ciertos aditivos o contaminantes asociados a los MPs (Acarer, 2023a).

Por ejemplo, los MPs con tamaños entre los 100-500 μm son los más abundantes en el agua cruda, lo cual influye directamente en los porcentajes de remoción, dado que los estudios soportan que es más fácil eliminarlos que los más pequeños, los cuales pueden escapar de los procesos de filtración y sedimentación (Dronjak et al., 2022).

Adicionalmente, el porcentaje de remoción de MPs varía según el tipo de sistema de tratamiento de agua potable y la tecnología aplicada, siendo más eficientes los que usan flotación y filtración de carbón activado granular, para MPs de mayor tamaño ($> 50 \mu\text{m}$) los cuales se eliminan casi por completo, mientras que los de menor tamaño ($1-10 \mu\text{m}$) son más difíciles de retener. La forma de los MPs también influye en su remoción, siendo más fácil eliminar los fragmentos que las fibras (Pivokonsky et al., 2018b).

Sin embargo, el sistema de tratamiento con mayor eficiencia en la remoción de MPs de acuerdo a la revisión bibliográfica es el que combina pre-ozonización, coagulación-floculación, sedimentación, filtración de arena, ozonización, filtración GAC, tratamiento UV y cloración, para MPs con un tamaño superior a $25 \mu\text{m}$ (Barbier et., al. 2022). Este sistema se aplicó en tres plantas de tratamiento de agua potable en Francia y logró una eficiencia de remoción de MPs $>99,0 \%$. La razón por la que este sistema es tan eficiente es que utiliza múltiples etapas de tratamiento que pueden eliminar MPs de diferentes tamaños, formas y tipos de polímeros. La ozonización y la filtración GAC son especialmente efectivas para degradar y adsorber MPs pequeños ($<10 \mu\text{m}$), mientras que la coagulación-floculación, la sedimentación y la filtración de arena pueden eliminar MPs más grandes ($>10 \mu\text{m}$). La desinfección con UV y cloro también puede contribuir a la inactivación y oxidación de MPs.

Es importante aclarar, que actualmente no hay un enfoque uniforme para analizar las partículas microplásticas y los investigadores utilizan métodos, equipos, límites de detección y volúmenes de muestreo diferentes para cuantificar la presencia de MPs en el agua. Debido a las variaciones en las condiciones durante el análisis de MP, los resultados de los estudios que investigan la abundancia de MPs en PTAP no se pueden comparar directamente entre sí, dado que las condiciones como el tamaño, la forma, la cantidad y la metodología de los MPs objeto de

investigación en cada PTAP son muy variables. Adicionalmente, diversas investigaciones han comprobado que los nanoplasticos, que tienen un tamaño menor a 1 μm y se generan a partir de la descomposición de los MPs, pueden representar un riesgo tóxico tanto para los seres humanos como para los organismos acuáticos (Jung, J., Kim, Kim, Jeong, & Lee, 2022b).

5. Conclusiones

Los microplásticos, fragmentos plásticos de menos de 5 mm, contaminan tanto el agua embotellada como la del grifo, amenazando la salud humana y el medio ambiente. Predominantemente presentes en formas como fibras, fragmentos y películas, los plásticos comunes, como PE, PP y PET, provienen de diversas fuentes, incluida la degradación de productos plásticos, lavado de ropa sintética, uso de cosméticos, desgaste de neumáticos y sistemas de distribución de agua potable.

Los métodos convencionales, como coagulación, floculación, sedimentación, filtración de arena y desinfección, reducen significativamente la concentración de microplásticos en el agua cruda, aunque no logran eliminarlos por completo. La eficacia de la remoción depende de factores como el tipo y la cantidad de coagulante, el pH, el tiempo de sedimentación, el diámetro del grano y la porosidad del filtro, además de la presencia de otros contaminantes y la estación del año.

La falta de estándares en los métodos de muestreo y análisis dificulta la comparación de resultados entre estudios, resaltando la importancia de adoptar métodos estandarizados. Aunque se identifica que el sistema de tratamiento que combina pre-ozonización, coagulación-floculación, sedimentación, filtración de arena, ozonización, filtración GAC, tratamiento UV y cloración es el más eficiente para remover microplásticos de más de 25 μm , con una eficiencia de remoción superior al 99%. La generalización de estos resultados se ve limitada por factores como la calidad

del agua, dosis aplicada, tiempo de contacto, tipo de microorganismos y la generación de subproductos en cada etapa unitaria del proceso de tratamiento.

La filtración por membrana destaca por su alta eficiencia, aunque se resalta la necesidad de más investigaciones para abordar la posible liberación de microplásticos desde las membranas, que podría generar una fuente adicional de contaminación. Además, se confirma que los nanoplásticos, partículas de plástico de menos de 1 μm derivadas de la descomposición de microplásticos, representan un riesgo tóxico.

La existencia de microplásticos representa un desafío ambiental y de salud pública que demanda el desarrollo de nuevas tecnologías y estándares para asegurar su completa eliminación. Es necesario implementar medidas preventivas y de control en las fuentes de origen, como el uso responsable de productos plásticos, prácticas de reciclaje, programas de educación ambiental y marcos legales adecuados.

6. Recomendaciones

Los estudios e investigaciones realizadas han confirmado la presencia de los MPs en las PTAP las cuales pueden funcionar como una barrera para prevenir su presencia en el agua potabilizada. No obstante, dado que no existe una tecnología de tratamiento específica para este contaminante, ni normativas que indiquen un límite legal para su presencia en el agua potable, es necesario intensificar las investigaciones en cada una de las etapas del tratamiento, tal como lo sugirió en algún momento la Organización Mundial de la Salud (Sharifi & Movahedian Attar, 2022).

Algunas de las áreas de investigación prioritarias son: Desarrollar métodos de detección y cuantificación de nanoplásticos., Evaluar el impacto de los microplásticos en la calidad

microbiológica del agua potable e Investigar los efectos de los microplásticos en la salud humana a largo plazo.

Referencias bibliográficas

- Acarer, S. (2023a). Abundance and characteristics of microplastics in drinking water treatment plants, distribution systems, water from refill kiosks, tap waters and bottled waters. *Science of the Total Environment*, 884, 163866. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.163866
- Acarer, S. (2023b). Abundance and characteristics of microplastics in drinking water treatment plants, distribution systems, water from refill kiosks, tap waters and bottled waters. *Science of the Total Environment*, 884, 163866. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.163866
- Adib, Danial & Mafigholami, Roya & Tabeshkia, Hossein. (2021). Identification of Microplastics in Conventional Drinking Water Treatment Plants in Tehran, Iran. 10.21203/rs.3.rs-242504/v1.
- Association of Plastic Manufacturers, 2020 Association of Plastic Manufacturers Plastics—the Facts 2020 PlasticEurope. PlasticEurope, London, UK (2020), pp. 1-64
- Bäuerlein, P. S., Hofman-Caris, R. C. H. M., Pieke, E. N., & ter Laak, T. L. (2022). Fate of microplastics in the drinking water production. *Water Research*, 221, 118790. doi:10.1016/j.watres.2022.118790
- Barbier, J.S., Dris, R., Lecarpentier, C., Raymond, V., Delabre, K., Thibert, S., Tassin, B., Gasperi, J., 2022. Microplastic occurrence after conventional and nanofiltration processes at drinking

water treatment plants: preliminary results. *Front. Water* 4. <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.886703>.

Blettler, M. C., M., Ulla, M. A., Rabuffetti, A. P., & Garello, N. (2017). Plastic pollution in freshwater ecosystems: Macro-, meso-, and microplastic debris in a floodplain lake. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(11), 1-13. doi: <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1007/s10661-017-6305-8>

Cheng, Y. L., Kim, J., Kim, H., Choi, J. H., Fai Tsang, Y., & Baek, K. (2021). Occurrence and removal of microplastics in wastewater treatment plants and drinking water purification facilities: A review. *Chemical Engineering Journal*, 410, 128381. doi:10.1016/j.cej.2020.128381

Dronjak, L., Exposito, N., Rovira, J., Florencio, K., Emiliano, P., Corzo, B., . . . Sierra, J. (2022). Screening of microplastics in water and sludge lines of a drinking water treatment plant in catalonia, spain. *Water Research*, 225, 119185. doi:10.1016/j.watres.2022.119185

Europe, P. (2020). Plastics—the facts 2020. PlasticEurope, 1, 1-64.

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

Islam, M. S., Islam, Z., Jamal, A. H. M. Shofiul Islam Molla, Momtaz, N., & Beauty, S. A. (2023). Removal efficiencies of microplastics of the three largest drinking water treatment plants in bangladesh. *Science of the Total Environment*, 895, 165155. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.165155

- Jung, J., Kim, S., Kim, Y., Jeong, S., & Lee, J. (2022). Tracing microplastics from raw water to drinking water treatment plants in busan, south korea. *Science of the Total Environment*, 825, 154015. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.154015
- Kirstein, I. V., Hensel, F., Gomiero, A., Iordachescu, L., Vianello, A., Wittgren, H. B., & Vollertsen, J. (2021). Drinking plastics? – quantification and qualification of microplastics in drinking water distribution systems by μ FTIR and py-GCMS. *Water Research*, 188, 116519. doi:10.1016/j.watres.2020.116519
- Koelmans, A. A., Mohamed Nor, N. H., Hermesen, E., Kooi, M., Mintenig, S. M., & De France, J. (2019). Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality. *Water Research*, 155, 410-422. doi:10.1016/j.watres.2019.02.054
- Kundu, A., Shetti, N. P., Basu, S., Raghava Reddy, K., Nadagouda, M. N., & Aminabhavi, T. M. (2021). Identification and removal of micro- and nano-plastics: Efficient and cost-effective methods. *Chemical Engineering Journal*, 421, 129816. doi:10.1016/j.cej.2021.129816
- Mehmood, T., Mustafa, B., Mackenzie, K., Ali, W., Sabir, R. I., Anum, W., . . . Peng, L. (2023). Recent developments in microplastic contaminated water treatment: Progress and prospects of carbon-based two-dimensional materials for membranes separation. *Chemosphere*, 316, 137704. doi:10.1016/j.chemosphere.2022.137704
- Menon, V., Sharma, S., Gupta, S., Ghosal, A., Nadda, A. K., Jose, R., . . . Raizada, P. (2023). Prevalence and implications of microplastics in potable water system: An update. *Chemosphere*, 317, 137848. doi:10.1016/j.chemosphere.2023.137848

Mintenig, S. M., Löder, M. G. J., Primpke, S., & Gerdtts, G. (2019). Low numbers of microplastics detected in drinking water from ground water sources. *Science of the Total Environment*, 648, 631-635. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.08.178

Miranda, D. (2023c, junio 5). 20 datos sobre el problema del plástico en el mundo. *www.nationalgeographic.com.es*. Recuperado de <https://www.nationalgeographic.com.es>

Mrowiec, B. (2017). Plastic pollutants in water environment. *Environmental Protection and Natural Resources*, 28(4) 51-55. <https://doi.org/10.1515/oszn-2017-0030>

Pivokonsky, M., Cermakova, L., Novotna, K., Peer, P., Cajthaml, T., & Janda, V. (2018). Occurrence of microplastics in raw and treated drinking water. *Science of the Total Environment*, 643, 1644-1651. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.08.102

PlasticsEurope, E. P. R. O. (2019). Plastics—the facts 2019. An analysis of European plastics production, demand and waste data. PlasticEurope <https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/1804-plastics-facts-2019>.

PlasticsEurope. (2020). Plastics—the Facts 2020: An analysis of European plastics production, demand and waste data. https://www.plasticseurope.org/application/files/2416/0910/9524/Plastics_the_facts_2020_FINAL.pdf

Qian, N., Gao, X., Lang, X., Deng, H., Bratu, T. M., Chen, Q., . . . Min, W. (2024). Rapid single-particle chemical imaging of nanoplastics by SRS microscopy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(3), e2300582121. doi:10.1073/pnas.2300582121

- Shen, M., Zeng, Z., Wen, X., Ren, X., Zeng, G., Zhang, Y., Xiao, R., 2021. Presence of microplastics in drinking water from freshwater sources: the investigation in Changsha, China. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28, 42313–42324. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13769-x>. Sheng, D.P.W., Bilad
- Shruti, V. C., Kuttralam-Muniasamy, G., Pérez-Guevara, F., Roy, P. D., & Elizalde-Martínez, I. (2022). Free, but not microplastic-free, drinking water from outdoor refill kiosks: A challenge and a wake-up call for urban management. *Environmental Pollution*, 309, 119800. doi:10.1016/j.envpol.2022.119800
- Wang et al., 2019a L. Wang, A. Kaeppler, D. Fischer, J. Simmchen Photocatalytic TiO₂ micromotors for removal of microplastics and suspended matter *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 11 (2019), pp. 32937-32944.
- Wang, Z., Lin, T., & Chen, W. (2020). Occurrence and removal of microplastics in an advanced drinking water treatment plant (ADWTP). *Science of the Total Environment*, 700, 134520. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.134520
- Woodings, C. (2019). *Regenerated Cellulose Fibres*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-01695-8>
- Yusuf, A., Sodiq, A., Giwa, A., Eke, J., Pikuda, O., Eniola, J. O., . . . Bilad, M. R. (2022). Updated review on microplastics in water, their occurrence, detection, measurement, environmental pollution, and the need for regulatory standards. *Environmental Pollution*, 292, 118421. doi:10.1016/j.envpol.2021.118421

Zhou, X., Wang, J., Li, H., Zhang, H., Hua-Jiang, & Zhang, D. L. (2021). Microplastic pollution of bottled water in china. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101884. doi:10.1016/j.jwpe.2020.101884