



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

PROGRAMA UNIVERSITARIO DE INVESTIGACIÓN INTERDISCIPLINARIA EN SALUD

nombre del programa universitario de investigación de la Digi

MICROPLÁSTICOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN VILLA NUEVA, DEPARTAMENTO DE GUATEMALA

nombre del proyecto de investigación

Número de partida 4.8.63.5.80

número de partida presupuestaria

Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Facultad de Ingeniería-USAC

unidad académica o centro no adscrito a unidad académica que avaló el proyecto

Inga. Paula María Vásquez Cifuentes

nombre del coordinador del proyecto y equipo de investigación contratado por la Digi

Guatemala, 28 de febrero del 2025

lugar y fecha de presentación del informe final dd/mm/año



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Contraportada

Autoridades de la Dirección General de Investigación

Dra. Alice Burgos Paniagua

Directora General de Investigación

Ing. Paula María Vásquez Cifuentes

Coordinador(a) del Programa Universitario de Investigación

Autores

Paula María Vásquez Cifuentes, 20170845

Ana Luisa Droege Romero, 202000542

Moisés Estuardo López Estrada, No. Registro de Personal

Astrid Daniela Gálvez-Sobral Araujo, 20220813

Colaboradores:

Licda. Ingrid Benítez Pacheco

Centro de Investigaciones de ingeniería, FIUSAC

El contenido de este informe de investigación es responsabilidad exclusiva de sus autores.

Esta investigación fue cofinanciada con recursos del Fondo de Investigación de la Digi de la Universidad de San Carlos de Guatemala a través de la partida presupuestaria número: 4.8.63.5.80 en el Programa Universitario de Investigación Interdisciplinaria en Salud.

Los autores son responsables del contenido, de las condiciones éticas y legales de la investigación desarrollada.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Índice general

Resumen	7
Abstract.....	7
1 Introducción.....	8
2 Contexto de la investigación.....	9
3 Revisión de literatura.....	10
4 Planteamiento del problema	13
5 Objetivos.....	14
5.1 General.....	14
5.2 Específicos:	15
6 Hipótesis	15
7 Método.....	15
7.1 Tipo de investigación.....	16
7.2 Enfoque y alcance de la investigación.....	16
7.3 Diseño de la investigación	17
7.4 Población, muestra y muestreo	18
7.5 Técnicas	18
7.6 Resumen de las variables o unidades de análisis	20
7.7 Procesamiento y análisis de la información.....	22
8 Resultados y discusión.....	23
8.1 Resultados.....	23
8.1.1 Cuantificación de partículas	24
8.1.2 Morfología de partículas.....	24
8.1.3 Comportamiento de muestras según las fases de tratamiento.....	27
8.1.4 Prueba de Normalidad	29
8.1.5 Pruebas pareadas de Wilcoxon.....	30
8.1.6 Correlación entre DQO y MPs	31
8.1.7 Espectros IR.....	31
8.2 Discusión de resultados.....	37



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

9	Beneficiarios directos e indirectos.....	40
10	Estrategia de divulgación y difusión de los resultados.....	40
10.1	Contribución a las Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND).....	41
10.2	Vinculación.....	42
11	Conclusiones.....	42
12	Recomendaciones	43
	Fortalecimiento del marco legal para la regulación de microplásticos:.....	44
	Fortalecimiento de la investigación en remoción de microplásticos en PTARs.....	44
	Medidas preventivas a nivel doméstico e industrial	44
	Estudio estadístico robusto para un indicador de MPs en cuerpos de agua.....	44
13	Referencias	45
14	Apéndice.....	51
14.1	Muestreo en PTARs.....	52
14.2	Tratamiento químico en laboratorio.....	57
14.3	Microplásticos extraídos de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales	59
14.4	Presentación de resultados	59
	Declaración del coordinador (a) del proyecto de investigación	60
	Aval del director (a) del instituto, centro, unidad o departamento de investigación o coordinador de investigación del centro regional universitario.....	60
	Aprobación de la Dirección General de Investigación.....	61

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Índice de Tablas

Tabla 1. Objetivos, variable, instrumentos y unidad de medida o cualificación utilizada en la investigación.	20
Tabla 2. Cantidad de mps y su respectiva desviación estándar, en la entrada y salida de las PTAR estudiadas, así cómo el porcentaje de retención por planta.	24
Tabla 3. Resultados de análisis pareado de Wilcoxon utilizando datos de dos fases de las ptars evaluadas (afluente y efluente) para las dos épocas climáticas (ES y EL). Valor de significancia de 0.05.	30
Tabla 4. Resultados de la prueba de correlación de Spearman aplicada a los datos obtenidos de microplásticos (mps) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) registrados en las cuatro ptars evaluadas. El nivel de significancia es de 0.05.	31

Índice de Figuras

Figura I Gráfico circular, evidencia las proporciones de las diferentes categorías de morfología de la población según la época climática extraída. Gráfico generado por Microsoft Excel (Versión 2021) [Software de computadora].	25
Figura II Gráfico de rectángulos, evidencia las proporciones de las diferentes categoría de morfología de la población completa de MPs extraídos. Gráfico generado por Microsoft Excel (Versión 2021) [Software de computadora].	26
Figura III Gráficas de cuantil cuantil de los datos de microplásticos detectados y que corresponden a los afluentes para época seca y lluviosa (ESPTARA y ELPTARA) y de los efluentes para época seca y lluviosa (ESPTARE y ELPTARE).	27
Figura IV Promedio de microplásticos (MPs) registrados en las cuatro fases evaluadas de las cuatro PTARs, correspondientes a la ES (a) y a la EL (b). (Fases evaluadas: A=Afluente, P=Tratamiento Primario, S=Tratamiento secundario, E=Efluente).	28
Figura V Gráficas de cuantil cuantil de los datos de microplásticos detectados y que corresponden a los afluentes para época seca y lluviosa (ESPTARA y ELPTARA) y de los efluentes para época seca y lluviosa (ESPTARE y ELPTARE).	29
Figura VI. Diagrama circular de los compuestos caracterizados por medio de espectroscopía infrarroja, en el equipo FTIR modelo Frontier, Perkin Elmer.	31
Figura VII. Espectros correspondientes a poliéster obtenidos de MPs extraídos en diferentes etapas y plantas de tratamiento, caracterizados por medio de espectroscopía infrarroja, en el equipo FTIR modelo Frontier, Perkin Elmer. a) Imagen correspondiente a muestra SP1AF11, corresponde a una fibra con superficie lisa, blanca que fluoresce amarillo. b) Imagen correspondiente a muestra LP1EF11, corresponde a una fibra gruesa, fluoresce verde.	32
Figura VIII MPS bajo luz led y luz uv, correspondientes a Espectros de poliéster obtenidos de MPs extraídos en diferentes etapas y plantas de tratamiento. a) Imagen correspondiente a muestra SP1AF11, bajo luz normal. b) Imagen correspondiente	

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

a muestra SP1AF11, bajo luz UV. c) Imagen correspondiente a muestra LP1EF11, bajo luz normal. d) Imagen correspondiente a muestra LP1EF11, bajo luz UV.....	33
Figura IX Espectros correspondiente a polipropileno, obtenidos de MPs extraídos en diferentes etapas y plantas de tratamiento, caracterizados por medio de espectroscopía infrarroja, en el equipo FTIR modelo Frontier, Perkin Elmer. a) Imagen correspondiente a muestra LP1SA31, corresponde a un amorfo negro, no fluorescente. b) Imagen correspondiente a muestra LP1SFM31, corresponde a un film liso, de apariencia uniforme traslucido, fluoresce amarillo.	34
Figura X MPS bajo luz led y luz uv, correspondientes a Espectros de polipropileno obtenidos de MPs extraídos en diferentes etapas y plantas de tratamiento. a) Imagen correspondiente a muestra LP1SA31, bajo luz normal. b) Imagen correspondiente a muestra LP1SA31, bajo luz UV. c) Imagen correspondiente a muestra LP1SA31, bajo luz normal. d) Imagen correspondiente a muestra LP1SA31, bajo luz UV.	35
Figura XI Espectros correspondiente a polivinilo, obtenidos de MPs extraídos en diferentes etapas y plantas de tratamiento, caracterizados por medio de espectroscopía infrarroja, en el equipo FTIR modelo Frontier, Perkin Elmer. a) Imagen correspondiente a muestra SP3EF11, corresponde a un cúmulo de fibras. b) Imagen correspondiente a muestra LP4AFM31, corresponde a un film azul densa, no fluorescente.....	36
Figura XII MPS bajo luz led y luz uv, correspondientes a espectros de polivinilo obtenidos de MPs extraídos en diferentes etapas y plantas de tratamiento. a) Imagen correspondiente a muestra SP3EF11, bajo luz normal. b) Imagen correspondiente a muestra SP3EF11, bajo luz UV. c) Imagen correspondiente a muestra LP4AFM31, bajo luz normal. d) Imagen correspondiente a muestra LP4AFM31, bajo luz UV.....	37

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Resumen

Los microplásticos (MPs) son contaminantes emergentes que han sido detectados en diversos ecosistemas, con efectos potenciales en la salud humana y ambiental. En Guatemala, la información sobre su presencia en aguas residuales es limitada. Esta investigación tuvo como objetivo determinar la presencia y variabilidad de MPs en cuatro plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs) del municipio de Villa Nueva, evaluando su concentración a lo largo de las etapas de tratamiento y en diferentes estaciones climáticas.

El estudio, de enfoque cuantitativo y diseño descriptivo, incluyó el muestreo en cuatro puntos clave dentro de cada PTAR: afluente (A), post-tratamiento primario (P), post-tratamiento secundario (S) y efluente final (E). Se emplearon técnicas de filtración, digestión química y espectroscopía infrarroja (ATR-FTIR) para la identificación de MPs. Los datos fueron analizados mediante estadística descriptiva y comparativa para evaluar la eficiencia de remoción en cada etapa del proceso.

Los resultados evidenciaron que los MPs no son completamente eliminados por los sistemas de tratamiento convencionales y que su concentración varía según la estación climática. Los hallazgos fueron compartidos con autoridades municipales y operadores de PTARs, con el fin de mejorar los procesos de tratamiento. Además, esta información beneficiará a las comunidades de Villa Nueva y contribuirá a la protección de los ecosistemas acuáticos, promoviendo políticas públicas y estrategias de mitigación ante este contaminante emergente.

.

Palabras clave

Contaminación microplástica, Contaminantes ambientales, Contaminación del agua, Carga contaminante.

Abstract

Microplastics (MPs) are emerging contaminants that have been detected in various ecosystems, with potential effects on human and environmental health. In Guatemala, information on their presence in wastewater is limited. This study aimed to determine the presence and variability of MPs in four wastewater treatment plants (WWTPs) in the municipality of Villa Nueva, evaluating their concentration throughout the treatment stages and across different climatic seasons.

The research, with a quantitative approach and descriptive design, included sampling at four key points within each WWTP: influent, post-primary treatment, post-secondary treatment, and final effluent. Filtration, chemical digestion, and infrared spectroscopy (ATR-FTIR)

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

techniques were used for MP identification. The data were analyzed using descriptive and comparative statistics to assess the removal efficiency at each stage of the process.

The results showed that MPs are not completely removed by conventional treatment systems and that their concentration varies depending on the climatic season. The findings were shared with municipal authorities and WWTP operators to improve treatment processes. Additionally, this information will benefit the communities of Villa Nueva and contribute to the protection of aquatic ecosystems, promoting public policies and mitigation strategies for this emerging contaminant.

Keywords

microplastic pollution, Environmental Pollutants, Water pollution, pollutant load.

1 Introducción

Los ambientes domésticos e industriales son generadores de una amplia variedad de desechos, entre los cuales se encuentran los residuos sólidos y los contaminantes emergentes. Entre estos últimos, los microplásticos han despertado una creciente preocupación debido a su ubicuidad en el medio ambiente y a su potencial toxicidad (Stapleton & Hai, 2023). Los microplásticos se definen como fragmentos de plástico con un tamaño menor a 5 mm, los cuales pueden originarse de fuentes primarias, como cosméticos y textiles sintéticos, o secundarias, como el deterioro de plásticos más grandes (Marsden et al., 2019). En entornos domésticos, el lavado de ropa es una de las principales fuentes de liberación de microplásticos al medio acuático (De Falco et al., 2019).

El agua actúa como el principal vehículo de transporte de microplásticos, permitiendo su movilización a grandes distancias y facilitando su acumulación en diversos ecosistemas. El agua residual generada en hogares, comercios e industrias contiene no solo residuos orgánicos e inorgánicos, sino también microplásticos, lo que resalta la importancia del tratamiento adecuado antes de su liberación o reutilización (Ben-David et al., 2021). Para ello, las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) desempeñan un papel fundamental en la mitigación de la contaminación hídrica mediante la reducción de la carga de contaminantes (Sonune & Ghate, 2004).

Las PTAR operan mediante procesos físicos, químicos y biológicos diseñados para eliminar sólidos suspendidos, materia orgánica y contaminantes específicos. Sin embargo, los microplásticos han demostrado evadir en gran medida estos procesos, debido a su baja densidad y resistencia a la degradación (Horton & Dixon, 2018). Como resultado, una fracción significativa de los microplásticos presentes en el agua residual no es retenida en las PTAR y es descargada en cuerpos de agua naturales, afectando la calidad del agua y representando un riesgo para la fauna y las comunidades humanas que dependen de estos ecosistemas (Ziajahromi et al., 2017).

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

La preocupación sobre los impactos ecológicos de los microplásticos ha sido confirmada en estudios previos, los cuales han demostrado que estos contaminantes pueden ser ingeridos por organismos acuáticos, generando efectos adversos como desnutrición, alteraciones reproductivas y toxicidad química a través de procesos de bioacumulación y biomagnificación (Barboza et al., 2018; Miller et al., 2020). Además, los microplásticos pueden adsorber contaminantes persistentes y metales pesados, lo que incrementa el riesgo de exposición a sustancias tóxicas en los ecosistemas y en las comunidades humanas (Zhao et al., 2022; Turner & Holmes, 2015).

En Guatemala, la problemática de los microplásticos aún no ha sido ampliamente estudiada, existiendo vacíos de información sobre su presencia, concentraciones y dinámicas en ecosistemas acuáticos y sistemas de tratamiento de agua. Por ello, esta investigación se enfocó en determinar la presencia de microplásticos en las aguas residuales del municipio de Villa Nueva, Guatemala, y evaluar su variación en cuatro PTARs durante las estaciones climáticas de época seca y lluviosa. El estudio busca contribuir al conocimiento científico sobre el comportamiento de los microplásticos en las PTARs y su eficiencia en la retención de estos contaminantes emergentes.

Los hallazgos de esta investigación benefician a la municipalidad de Villa Nueva al proporcionar información clave para el diseño e implementación de estrategias de mitigación. Asimismo, las comunidades que dependen del agua tratada por estas PTARs se benefician de mejoras en la calidad del agua, reduciendo los riesgos ambientales y de salud asociados a la contaminación por microplásticos. Además, los resultados obtenidos podrán servir como base para el desarrollo de políticas públicas enfocadas en la regulación y reducción de los microplásticos en fuentes hídricas

2 Contexto de la investigación

Los contaminantes emergentes son uno de los grupos más importantes de contaminantes que han tomado protagonismo en los últimos años, ya que son muy diversos, muchos de estos no tienen una regulación específica y han ido incrementando su presencia en el medio ambiente. Estos contaminantes pueden incluir productos farmacéuticos, de cuidado personal, disruptores endocrinos, químicos industriales, etc. (Li *et al.*, 2024). Los microplásticos son uno de los contaminantes emergentes más importantes, debido a que se han encontrado en alarmantes cantidades en el ambiente y poseen un alto potencial de toxicidad para todos los organismos expuestos a estos (Stapleton & Hai, 2023). En Guatemala, los microplásticos no han sido estudiados extensamente, por lo que existen varios vacíos de información en cuanto a este contaminante presencia-ausencia, cantidades, tipo de microplásticos, etc. Esta investigación trató de determinar la presencia de microplásticos en aguas residuales, específicamente en el municipio de Villa Nueva, Guatemala. Además, se trató de establecer las variaciones de los microplásticos (cualitativa y cualitativamente) en cuatro plantas de

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

tratamiento de aguas residuales (PTARs) que se encuentran en Villa Nueva. En cuanto a la variación temporal, se estableció un muestreo de microplásticos en cada una de las estaciones climáticas existentes en el país (época seca y lluviosa). Esta investigación puede beneficiar a la municipalidad de Villa Nueva, ya que los resultados podrían ayudar a entender cómo es el comportamiento de este contaminante emergente en las PTARs y cómo se podrían manejar y erradicar estos utilizando las PTARs. Esto podría beneficiar a las poblaciones que habitan el municipio de Villa Nueva y que utilizan las aguas tratadas que salen de las PTARs de su municipio, además de ayudar a los ecosistemas acuáticos (ríos) removiendo dichos contaminantes y eliminando los efectos que puedan tener en la biota.

3 Revisión de literatura

Los microplásticos se definen como fragmentos de plástico menores a 5 mm (Marsden et al., 2019). Son considerados como un contaminante emergente, todavía no se ha llegado a tener un entendimiento general sobre los mecanismos que rigen su formación, propagación y efectos sobre la salud (Avio et al., 2017). Los microplásticos empezaron a tener visibilidad ante el aumento de su concentración en ecosistemas marinos, lo cual los introdujo a la red trófica y provocaron consecuencias negativas en la salud de la fauna local (Varg et al., 2022). Los microplásticos se pueden absorber en seres vivos cuando presentan tamaños menores a 40 μm (Stollberg et al., 2021). Además, tienen la capacidad de transportar elementos químicos u orgánicos como metales pesados o contaminantes orgánicos persistentes (Liu et al., 2022; L.-C. Wang et al., 2021). Considerando que las condiciones internas del tracto digestivo podrían liberar los contaminantes adsorbidos por los microplásticos, según simulaciones (Li et al., 2022), los microplásticos y sus contaminantes pueden terminar bioacumulándose en los organismos y biomagnificándose a través los niveles tróficos (Parolini et al., 2023). Los efectos perjudiciales se siguen estudiando, sin embargo, es recomendable enfocarse en reducir las fuentes de emisiones (Kay et al., 2018).

Los plásticos son un material de uso extendido, ya que solucionan necesidades de contención, empaque, electrónicos, entre otras aplicaciones (Thompson et al., 2009). Sin embargo, los objetos plásticos de un solo uso suelen ser desechados incorrectamente, llegando a los cuerpos de agua, reportándose emisiones de hasta 1,000,000 toneladas métricas por año según modelaciones (Meijer et al., 2021). Al introducirse en los ambientes, pueden llegar a lugares muy lejanos de su lugar de origen a través de cuerpos de agua o el aire, así como acumularse en el suelo hasta formar parte del subsuelo (Bao et al., 2023; Sajjad et al., 2022).

Se diferencian dos tipos de microplásticos según su origen: primarios y secundarios. Los primarios son aquellos que provienen de la producción industrial de piezas pequeñas de plástico (T. Wang et al., 2019). Incluyen microesferas de plástico provenientes de cosméticos, pintura y el desgaste de llantas (An et al., 2020). Mientras tanto, los microplásticos secundarios son originados del desprendimiento de piezas de plástico grandes

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

preexistentes, por ejemplo, botellas (Song et al., 2024). Estos suelen formarse por acción de los factores ambientales, tales como abrasión con superficies y radiación ultravioleta (Sun et al., 2022). Los microplásticos secundarios suelen permanecer por más tiempo en masas de agua naturales (Eerkes-Medrano et al., 2015).

Ambos tipos de microplásticos pueden provenir de ambientes domésticos o laborales. Esto se da por degradación de textiles y herramientas plásticas envejecidas por uso, estas partículas son arrastradas en las aguas residuales (F. Wang et al., 2020). El agua además lleva consigo una carga orgánica que viene de la preparación de comida, jabón, excretas humanas y procesos industriales; lo cual hace que tenga también una carga inorgánica y microbiológica importante (Newton et al., 2015).

Los microplásticos acarreados por el agua son captados en el afluente de las plantas de tratamiento de agua residual. Las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) juegan un papel importante en reducir los contaminantes que entran al ambiente acuático, pero aún hay un gran número de microplásticos que salen de las PTAR que se liberan a los cuerpos de agua (Long et al., 2019). En estudios anteriores en otros países, el agua residual municipal se ha encontrado contaminación con microplásticos no solo al ingreso del tratamiento, sino también en el efluente (Mason et al., 2016). Para su reducción, se recomienda aumentar las medidas de control en el tratamiento de aguas servidas ya que provienen del uso diario de productos plásticos (T. Wang et al., 2019). Entre estos, de los más importantes se considera la contribución del lavado de ropa y su desgaste en las emisiones (De Falco et al., 2019).

Las PTAR están compuestas de una serie de procesos secuenciales que buscan eliminar los contaminantes del agua, a modo que sea segura para su destino. A pesar de que no todas las PTAR cuentan con los mismos equipos de saneamiento, los pasos del proceso se clasifican en tratamiento primario, secundario y terciario según el tipo de materia que busca eliminar (Sonune & Ghate, 2004). En el tratamiento primario se eliminan los sólidos gruesos y suspendidos, principalmente por medio de sedimentación. Seguidamente, en el tratamiento secundario se retira la materia biodegradable. El tratamiento terciario se acomoda según el fin del agua tratada, pero comúnmente involucra la desinfección del agua por métodos químicos.

Se han establecido procedimientos básicos para la extracción de microplásticos, enfocados para muestras del ambiente marino, por recomendación de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés) en su manual de métodos de laboratorio (Masura et al., 2015). En este, se menciona la necesidad de un pretratamiento por medio de una digestión orgánica para eliminar los restos de orgánicos que pueden dificultar la extracción o ser confundidos por plásticos. La digestión orgánica más utilizada es la oxidación en húmedo con peróxido de hidrógeno en conjunto con el catalizador de sulfato de hierro (II). En algunos casos, cuando la muestra contiene grasas, se hace uso de

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

surfactantes (López-Rosales et al., 2021) o vías enzimáticas (Cole et al., 2014) para eliminar esta contaminación, debido a la resistencia de la cadena de ácidos grasos a las vías de digestión usuales. Asimismo, la separación por densidad es un paso de la extracción en muestras que demuestran tener muchos residuos inorgánicos sedimentables, al poner la muestra en contacto con una solución de alta densidad y recuperar el sobrenadante (Masura et al., 2015). El uso de cloruro de sodio es común por su conveniencia y costo, aunque se han considerado el uso de otras sales para aumentar la efectividad del proceso (Coppock et al., 2017).

La filtración del sobrenadante se realiza para separar los residuos sólidos remanentes de la fase acuosa utilizando un medio poroso, siendo esto vital para la cuantificación de micropartículas. Se hace uso de membranas de nitrato de celulosa, nylon, óxido de aluminio, entre otros; usados según la naturaleza de la matriz. La cuantificación comprende conteos manuales o automatizados de la membrana, usando en un estereoscopio. El conteo puede auxiliarse por tinciones con el objetivo de distinguir ciertos materiales. Como ejemplo está el Rojo de Nilo, el cual se adsorbe en superficies hidrofóbicas (Maes et al., 2017); y el Rosa de Bengala, el cual se adsorbe en superficies hidrofílicas (Gbogbo et al., 2020). Estos pueden dar un indicativo de la naturaleza de la partícula, sin embargo, no es una prueba confirmatoria. Para esto, se utiliza espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FTIR) y Raman, ambas técnicas que idealmente están acopladas a un microscopio que dirige el rayo directamente a una partícula por vez (Xu et al., 2019). Estas técnicas proveen información sobre la estructura de una molécula, dando certeza de la composición química.

Las metodologías de extracción de microplásticos en PTAR siguen una secuencia de pasos similar. Siendo la matriz de la muestra es más compleja que una muestra de agua de mar, el procedimiento se adapta para así cuantificar solamente los microplásticos que contiene la muestra. En el caso de las aguas residuales, esto se aprecia en el muestreo. En lugar de tratar directamente el agua cruda, se hace pasar por un tamiz con tal de retener solamente los sólidos, logrando considerar un volumen de muestra manejable (Carr et al., 2016).

En investigaciones sobre microplásticos en PTAR, se ha determinado que el 62.68 % de micropartículas son de origen polimérico en siete plantas de tratamiento en China, obteniendo un rango de 1.57 a 13.69 partículas por litro de agua residual analizada (Long et al., 2019). El porcentaje retenido en lodos es del 7.5 al 16%, siendo la mayoría retenidas en el pretratamiento de las aguas residuales en Australia (Ziajahromi et al., 2021). En varias investigaciones en países desarrollados se ha establecido que los tratamientos primarios y secundarios eliminan un gran porcentaje de microplásticos en aguas residuales (Tang & Hadibarata, 2021). En Canadá, se estableció la sedimentación primaria como la fase con mayor reducción de MPs en el efluente de agua residual (Gies et al. 2018). En Murcia, España, se determinó que el mejor sistema de las plantas estudiadas para retener

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

microplásticos con el 89.18% de eficiencia es el sistema de fangos activados convencional, seguido el contacto total flujo pistón y, por último, nitrificación-desnitrificación (Olmos, 2021). Una investigación en Bélgica concuerda que el mejor proceso de remoción de microplásticos es el de fangos activados (Vercauteren et al., 2022).

Las fibras y fragmentos son las partículas dominantes en el efluente de las PTAR, siendo PET el polímero encontrado con mayor frecuencia (Cristaldi et al., 2020). La longitud de los microplásticos encontrados fue menor a 1 mm en el 68.24 % de los casos, determinando que las plantas de tratamiento son efectivas para retener fragmentos poliméricos mayores a esa dimensión (Olmos, 2021). Tanto los contaminantes orgánicos persistentes y los microplásticos tienen resistencia a la degradación biológica y la capacidad de llegar a grandes distancias desde su origen o producción; ambos actúan en su camino coexistiendo en el medio ambiente donde se encuentren (Chakraborty et al., 2022).

Se ha considerado la necesidad de tener una medida accesible para la cuantificación de microplásticos, a través de una variable de rutina en las PTAR. Se ha observado que la DQO incrementa por los sólidos disueltos en las muestras de agua marina estudiadas, así también, determinó una relación entre los sólidos suspendidos totales como indicador del nivel de contaminación de microplásticos (Cruz, 2022).

4 Planteamiento del problema

Indique con claridad la brecha de conocimiento que identificó, puede ampliarla, fundamente la revisión de literatura que realizó antes, durante y después de haber realizado la investigación. Anote con claridad que se investigó y lo más importante para quién se investigó o grupo social, económico, académico o cultural que se benefició. En este apartado anote las preguntas de investigación (Incluir citas).

Los microplásticos pueden generarse en condiciones domésticas, en especial por cosméticos que contienen microplásticos como exfoliante o decoración (van Wezel et al., 2016), limpieza de ropa que contiene fibras plásticas o poliméricas (De Falco et al., 2019), deterioro de macroplásticos; entre otras situaciones. Siendo el agua un recurso vital, involucrada tanto en actividades domésticas y comerciales, suele portar microplásticos junto con otras sustancias orgánicas e inorgánicas contaminantes (Ben-David et al., 2021). Los microplásticos generados pueden viajar largas distancias usando el agua como su medio de transporte principal, terminando en los sedimentos de los cuerpos de agua o en el mar y perpetuando un ciclo del plástico (Horton & Dixon, 2018) si no existen medidas de contención.

Las plantas de tratamiento de agua residual están preparadas con procesos para remover los contaminantes gruesos en el afluente y disminuir la carga de contaminantes químicos y biológicos. Sin embargo, las operaciones no suelen estar diseñadas para la mitigación de microplásticos debido a que pertenecen a un campo de investigación relativamente nuevo

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

(Sedlak, 2017). A su vez, los microplásticos también pueden adsorber en su superficie contaminantes orgánicos persistentes (Fu et al., 2021) y metales pesados (Turner & Holmes, 2015).

En el caso de las PTAR de Villanueva, el efluente de la planta se desecha en el río Villalobos. El río luego aporta la mayoría del agua que conforma al lago de Amatitlán (van Tuylen, 2020), lago en el cual ya ha sido confirmada la contaminación por microplásticos en investigaciones anteriores (Oliva-Hernández et al., 2021). Mientras que en varias etapas de las PTAR existen sedimentadores para la remoción de sólidos, estos se enfocan en sólidos de alta densidad como arena que precipitan por gravedad. Al ser los plásticos de menor densidad que el agua, se puede esperar que estos floten y de esta manera evadan estos pasos cruciales de separación de sólidos. Las plantas de tratamiento cuentan con un circuito de operaciones característico para recibir cierto tipo de aguas y devolver agua con una mejor calidad. Por ello, es necesario considerar que las muestras obtenidas de cada planta pueden recibirse con una gran cantidad de sólidos orgánicos (Tran et al., 2015) y aceites (Sanghamitra et al., 2021), haciendo necesario ajustar procedimiento de extracción.

El efluente de las PTAR puede tener varios destinos, entre los cuales está ser liberado en masas de agua cercanas. Los microplásticos que no se logran eliminar en las PTAR se sueltan al medio ambiente. Esto expone a las personas y fauna que dependen de un cuerpo de agua para realizar sus actividades. Mientras que los efectos no han sido verificados en personas, se conoce que la vida silvestre es afectada negativamente la exposición crónica a piezas de plástico, como se ha comprobado en peces bajo experimentos controlados (Naidoo & Glassom, 2019), en bajo crecimiento de anfípodos (Au et al., 2015) y declive reproductivo en pulgas de mar (Jaikumar et al., 2019). Por ello, es importante determinar los niveles de contaminación por microplásticos en PTAR y la eficiencia de cada proceso para removerlos.

La metodología general para determinar microplásticos funciona en un gran número de muestras y también puede adaptarse a otras matrices (Masura et al., 2015). Sin embargo, este procedimiento puede llevar varios días en llevarse a cabo, debido al tiempo que hay que dedicar a cada paso. Hoy en día, se están buscando constantemente métodos de optimización que faciliten la toma de datos (Primpke et al., 2019). Por ello, se debe determinar si es posible identificar su cantidad a partir de una variable que es comúnmente medida en el proceso como la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

5 Objetivos

Los objetivos que se detallan a continuación fueron aprobados en la propuesta inicial, presentada a la Dirección General de Investigación.

5.1 General

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Determinar la presencia de microplásticos en el tratamiento de aguas residuales en la Municipalidad de Villa Nueva.

5.2 Específicos:

- Cuantificar la cantidad de microplásticos presentes en aguas residuales municipales antes y después de su tratamiento.
- Comparar los niveles de contaminación por microplásticos en aguas residuales municipales después de cada etapa de tratamiento.
- Establecer si existe una relación según las estaciones del año y la cantidad de microplásticos presentes en aguas residuales municipales.
- Examinar si existe una relación entre el DQO y la cantidad de microplásticos presentes en aguas residuales municipales.

6 Hipótesis

- Existe presencia de microplásticos en aguas residuales municipales, variando conforme la estación del año.
- Las plantas de tratamiento de agua no están aptas para tratar los microplásticos presentes en las aguas residuales, por tanto el efluente contiene MPs procedentes de los desechos municipales.
- La cantidad de microplásticos presentes disminuye con cada etapa de tratamiento.
- Los microplásticos y el DQO presentan una relación directamente proporcional.

7 Método

El estudio se llevó a cabo en cuatro plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) localizadas en el municipio de Villanueva, Guatemala, una zona de gran importancia debido a su actividad industrial y residencial, la cual contribuye significativamente al volumen de aguas residuales generadas. Estas plantas desempeñan un papel crucial en la mitigación del impacto ambiental, ya que tratan las aguas residuales antes de su reintegración al medio ambiente.

En cada una de las plantas, se definieron cuatro puntos de muestreo cuidadosamente seleccionados para abarcar todas las etapas clave del proceso de tratamiento. El primer punto corresponde al afluente (A), que representa el agua residual sin tratar al momento de ingresar a la planta, y proporciona una línea base para determinar la carga inicial de contaminantes, incluidos los microplásticos (MPs). El segundo punto de muestreo se ubicó inmediatamente después del tratamiento primario (P), una etapa donde se eliminan principalmente sólidos

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

sedimentables y flotantes mediante procesos físicos, como sedimentación y/o cribado. El tercer punto de muestreo fue situado tras el tratamiento secundario (S), una etapa que incluye procesos biológicos destinados a degradar materia orgánica y otros contaminantes disueltos. Finalmente, el cuarto punto corresponde al efluente tratado (E), es decir, el agua que ha completado todo el proceso de tratamiento y está lista para su disposición final en cuerpos de agua o su posible reutilización.

Esta metodología busca capturar una visión integral de la trayectoria de los microplásticos a través de las distintas etapas de tratamiento, permitiendo evaluar la eficiencia de cada proceso en su eliminación y proporcionando información clave para proponer mejoras en los sistemas de tratamiento actuales.

7.1 Tipo de investigación.

Según los Criterios de Frascati, establecidos en el *Manual de Frascati* de la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico), el estudio se trata de una investigación básica.

Según Frascati (2015) la investigación básica tiene como propósito principal adquirir nuevo conocimiento sobre fenómenos y hechos sin una aplicación directa. Esta categoría cuenta con un enfoque exploratorio, ya que es un área de estudio poco conocida o no ha sido suficientemente investigada.

El estudio tiene un enfoque concreto (los microplásticos en aguas residuales municipales), sin embargo, el propósito de generar conocimiento sin una aplicación inmediata y el hecho de que no se pretende intervenir o cambiar el fenómeno, sino únicamente estudiarlo y obtener datos, hace que se ajuste mejor a las características de la investigación básica.

7.2 Enfoque y alcance de la investigación.

El enfoque de la investigación es cuantitativo y se centra en la medición y análisis de la cantidad de microplásticos (MPs) presentes en las aguas residuales. El estudio busca establecer relaciones entre la concentración de MPs y variables específicas, tales como la estación del año y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en el agua residual, debido a la influencia que estos factores pueden tener sobre la presencia de microplásticos. La investigación también considera cómo las diferentes etapas de las plantas de tratamiento afectan la concentración de MPs, permitiendo así evaluar la efectividad de estos procesos para reducir la carga de contaminantes. Este enfoque se basa en hipótesis para datos pareados, utilizando técnicas estadísticas para comparar la concentración de MPs antes y después de cada etapa del tratamiento, lo que proporciona una visión más clara de la eficacia de cada fase en la eliminación de microplásticos.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

El alcance de la investigación incluye la caracterización cuantitativa de los microplásticos en las aguas residuales de las plantas de tratamiento, así como el análisis de la influencia de las condiciones ambientales y operativas sobre su concentración. Además, se evalúa el impacto de las diferentes fases del tratamiento de aguas residuales, determinando la eficiencia de las plantas para reducir la carga de MPs. Este enfoque es congruente con estudios previos que han abordado la presencia y eliminación de microplásticos en sistemas de tratamiento (Jiang et al., 2020; Smith et al., 2022), y pretende aportar evidencia sobre la relación entre las variables ambientales y el comportamiento de los MPs en los procesos de tratamiento, con el fin de optimizar las estrategias para su reducción.

7.3 Diseño de la investigación

La investigación adoptó un diseño experimental con un enfoque mixto y una lógica de recolección secuencial, en la que los datos cuantitativos y cualitativos se recolectaron y analizaron en etapas separadas y consecutivas. En cada una de las cuatro plantas de tratamiento de aguas residuales estudiadas, se tomaron muestras en cuatro puntos estratégicos (afluente, tratamiento primario, secundario y efluente), con tres réplicas independientes por punto, tanto en temporada seca como en lluviosa. Inicialmente, los métodos cuantitativos se emplearon para determinar la abundancia de microplásticos (MPs) en partículas por mililitro mediante filtración y observación con estereoscopio, generando datos numéricos que sirvieron como base para la siguiente etapa. Posteriormente, los métodos cualitativos se aplicaron para analizar la morfología de los MPs mediante estereoscopía y su composición molecular mediante espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier y reflectancia atenuada (ATR-FTIR). Este enfoque secuencial permitió un análisis ordenado y detallado, comenzando por la cuantificación de los MPs y continuando con la caracterización de sus propiedades físicas y químicas.

Para la visualización de los datos se realizaron gráficas de línea para visualizar los MPs/L registrados en cada fase de cada PTAR, tanto para ES como para EL. También se realizaron diagramas de dispersión para los datos registrados en cada fase de las PTARs (A, P, S y E) para ES y EL, con el objetivo de observar cómo se distribuían todos los datos, identificar presencia de datos extremos, etc.

En cuanto al análisis estadístico se realizaron pruebas pareadas de Wilcoxon para determinar si entre los afluentes (A) y efluentes (E) de las PTARs analizadas existían diferencias significativas. Asimismo se realizó una prueba de Wilcoxon para establecer si entre épocas (seca y lluviosa) existían diferencias significativas entre ESPTARA-ELPTARA y ESPTARE-ELPTARE. Además se realizaron pruebas de correlación de Spearman para tratar de establecer la correlación entre los datos de microplásticos (MPs) y demanda química de oxígeno (DQO) registrados en todas las PTARs en EL. Se realizaron gráficas cuantil-cuantil para visualizar la normalidad de los datos de MPs.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

7.4 Población, muestra y muestreo

Población: Microplásticos (MPs) en aguas residuales que entran en PTARs.

Muestra: 1 litro de aguas residuales tomadas de las cuatro distintas etapas (afluente, tratamiento primario, tratamiento secundario y efluente) de las PTARs evaluadas.

Muestra compuesta: muestra de 7 litros de aguas residuales formada por 7 muestras colectadas a cada hora durante el período de 7 horas.

Muestra final: muestra de 1 litro proveniente de la muestra compuesta. Esta muestra fue filtrada por medio de tamices. Todo lo retenido en los tamices fue lavado y depositado en un recipiente para su evaluación en laboratorio.

Tipo de muestreo: Muestreo compuesto en cada una de las etapas muestradas de cada una de las PTARs evaluadas, con el objetivo de obtener muestras representativas de MPs.

7.5 Técnicas

Técnicas de recolección: se utilizó un recipiente de 1 litro para coleccionar las muestras de aguas residuales en cada uno de las fases de las PTARs evaluadas (afluente, tratamiento primario, secundario y efluente).

Muestras compuestas: las muestras colectadas en cada hora y correspondientes para cada fase (afluente, tratamiento primario, secundario y efluente), fueron depositadas en su respectivo recipiente, el cual era de mayor volumen (20 litros), con el fin de tener una muestra compuesta. Al finalizar el tiempo de muestreo, las muestras compuestas de cada fase fueron homogeneizadas vigorosamente para que todos los MPs se mantuvieran en suspensión al momento de tomar una muestra final.

Filtración de muestras finales: las muestras finales (tomadas de las muestras compuestas) fueron filtradas por medio de tamices de 5 mm y 0.5 mm de apertura de malla. Todo lo retenido en los filtros fue lavado hacia un recipiente de vidrio de 1 litro. Estas muestras fueron llevadas al laboratorio para su posterior procesamiento y análisis.

Reducción del volumen de muestra: El proceso de laboratorio comenzó con la reducción del volumen de agua en las muestras recolectadas, realizándose por medio de evaporación controlada utilizando un horno de convección (SerProma, CHF5CSA, A305). Esto implicó calentar las muestras de manera progresiva, asegurándose de mantener la temperatura bajo control para evitar dañar o alterar la estructura de los microplásticos. La temperatura máxima utilizada fue de 90°C. El objetivo principal fue concentrar las partículas de microplásticos en un menor volumen de agua, lo que facilitó su manejo y análisis en las etapas posteriores.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Digestión de materia orgánica: Una vez concentradas las muestras, se eliminó la materia orgánica presente mediante la oxidación controlada con peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 50%, a una temperatura máxima de 80°C utilizando una plancha de calentamiento con agitador magnético (FisherScientific, Isotemp, 1892091139829). Este reactivo fue utilizado para descomponer restos orgánicos que podrían interferir en la identificación visual y en el conteo de los microplásticos. La reacción fue exotérmica, liberando calor, pero se manejó cuidadosamente para evitar impactos negativos en los microplásticos, que son generalmente resistentes a las concentraciones utilizadas de H_2O_2 . Aunque esta técnica fue eficaz, no se utilizó el método de Fenton, que incluye hierro ferroso (Fe^{2+}) como catalizador, debido a limitaciones presupuestarias. Sin embargo, el peróxido de hidrógeno por sí solo permitió una oxidación parcial y efectiva de los compuestos orgánicos.

Separación por densidad: Después de eliminar la materia orgánica, las muestras se sometieron a un proceso de separación por densidad utilizando conos Imhoff, mediante una solución saturada de cloruro de sodio (NaCl). Este método incrementó la densidad del medio, permitiendo que los microplásticos, al ser menos densos, flotaran en la superficie, mientras que las partículas más pesadas, como sedimentos y restos inorgánicos, se sedimentaron en el fondo del recipiente. Este principio se basa en la diferencia de densidades, aprovechando las propiedades físicas de los microplásticos, cuyos valores de densidad típicos oscilan entre 0.85 y 1.4 g/cm^3 , dependiendo del polímero. La solución salina fue clave para garantizar una separación eficiente, ya que el uso de agua pura no habría permitido diferenciar de manera efectiva entre los microplásticos y otros sólidos.

Filtración al vacío y tinción: El sobrenadante que contenía los microplásticos flotantes fue filtrado mediante una membrana de nitrato celulosa utilizando un sistema de vacío. Este procedimiento permitió retener los microplásticos en la superficie de la membrana, separándolos completamente del líquido. Posteriormente, los microplásticos fueron teñidos con Rojo Nilo, un colorante lipofílico que tiene afinidad por superficies hidrofóbicas, como las de los polímeros plásticos. Este tinte se adhiere a los microplásticos y, al ser expuestos a luz ultravioleta (UV), emite fluorescencia en colores rojo, anaranjado o amarillo, facilitando su identificación y diferenciación de otras partículas que no fluorescen. Posteriormente, utilizando una bomba de vacío (Marathon Electric, 5KH36KNA510X, G588X), se succionó el excedente de líquido, permitiendo obtener únicamente la membrana con los microplásticos teñidos en su superficie. Este método de tinción es ampliamente utilizado debido a su precisión y capacidad para resaltar los microplásticos incluso cuando son de menor tamaño.

Conteo y visualización: Finalmente, los microplásticos teñidos fueron observados y contabilizados utilizando un estereoscopio y luz UV. En esta etapa, se registró la cantidad de partículas presentes en cada muestra, discriminando entre los puntos de muestreo (afluente, tratamiento primario, secundario y efluente). Además, se documentaron sus características morfológicas, como forma (fibras, films, esferas o amorfos), y cualquier otra peculiaridad relevante para el análisis.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Después del conteo y visualización de los microplásticos en el laboratorio, se seleccionaron los microplásticos más grandes identificados en cada uno de los puntos de muestreo de las plantas de tratamiento de aguas residuales (afluente, tratamiento primario, secundario y efluente). Estos microplásticos seleccionados fueron clasificados en viales individuales para su análisis posterior.

Con el apoyo de la Universidad Mariano Gálvez de Guatemala, se procedió a analizar un total de 36 microplásticos seleccionados, distribuidos en un promedio de más de 8 viales por planta, sumando así las muestras representativas de las cuatro plantas evaluadas. Utilizando espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier con reflectancia atenuada (ATR-FTIR), se utilizó un espectrómetro FT-IR Perkin Elmer Frontier. Se identificó la composición química de los microplásticos. Esta técnica permitió caracterizar los polímeros mediante el análisis de las vibraciones moleculares en sus enlaces químicos, proporcionando una "huella química" precisa sin necesidad de modificar o destruir las muestras, lo que enriqueció los resultados del estudio con un nivel adicional de detalle.

Este enfoque permitió evaluar de manera integral la presencia de microplásticos en las muestras recolectadas, proporcionando datos tanto cuantitativos como cualitativos que son fundamentales para comprender la dinámica de los microplásticos a través del proceso de tratamiento de aguas residuales.

7.6 Resumen de las variables o unidades de análisis

Anote en la tabla los objetivos específicos, describa los instrumentos que utilizó y como midió o cualificó las variables o unidades de análisis.

Tabla 1. Objetivos, variable, instrumentos y unidad de medida o cualificación utilizada en la investigación.

Objetivo específico	Variable	Instrumentos	Unidad de medida o cualificación
Cuantificar la cantidad de microplásticos presentes en aguas residuales municipales antes y después de su tratamiento	Cantidad de microplásticos en aguas residuales municipales antes de su tratamiento	Estereoscopio, membrana de nitrato de celulosa, horno de convección, plancha de calentamiento con agitador magnético, conos Imhoff, bomba de vacío	Micropartículas presentes por litro de agua residual (MPs / L)

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

	Cantidad de microplásticos en aguas residuales municipales después de su tratamiento	Estereoscopio, membrana de nitrato de celulosa, horno de convección, plancha de calentamiento con agitador magnético, conos Imhoff, bomba de vacío	Micropartículas presentes por litro de agua residual (MPs / L)
Establecer si existe una relación según las estaciones del año y la cantidad de microplásticos presentes en aguas residuales municipales	Cantidad de microplásticos en aguas residuales en época seca.	Estereoscopio, membrana de nitrato de celulosa, horno de convección, plancha de calentamiento con agitador magnético, conos Imhoff, bomba de vacío	Micropartículas presentes por litro de agua residual (MPs / L)
	Cantidad de microplásticos en aguas residuales en época lluviosa	Estereoscopio, membrana de nitrato de celulosa, horno de convección, plancha de calentamiento con agitador magnético, conos Imhoff, bomba de vacío	Micropartículas presentes por litro de agua residual (MPs / L)
Examinar si existe una relación entre el DQO y la cantidad de microplásticos presentes en aguas residuales municipales	Microplásticos presentes en aguas residuales residenciales y municipales.	Estereoscopio, membrana de nitrato de celulosa, horno de convección, plancha de calentamiento con agitador magnético,	Micropartículas presentes por litro de agua residual (MPs / L)

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

		conos Imhoff ,bomba de vacío	
	Demanda química de oxígeno (DQO)	Kit para análisis DQO	Cantidad de oxígeno disuelto necesaria para descomponer los materiales orgánicos químicos (mg/L)

7.7 Procesamiento y análisis de la información.

Para los análisis estadísticos se utilizaron principalmente el conjunto de datos registrados en los afluentes (A) y efluentes (E) de las PTARs evaluadas. Los datos obtenidos en las fases de tratamiento primario (P) y secundario (S) no se utilizaron, ya que las cuatro PTARs tienen distintos tratamientos en estas fases (RAFAS, tanques de aireación, etc.), por lo que realizar comparaciones entre estos podría inducir a resultados erróneos.

En primer lugar, los resultados de MPs registrados en las fases A y E se analizaron para evaluar la normalidad de sus datos. Se realizaron gráficas de cuántil-cuántil (gráficas Q-Q) las cuales ayudan a la visualizar si el grupo de datos tiene una distribución normal (Fields & Miles, 2010).

La evaluación de las hipótesis fueron analizadas mediante una prueba pareada de Wilcoxon, la cual es una prueba no paramétrica que se utiliza para analizar las diferencias entre distintos grupos (de par en par) y si estas diferencias son estadísticamente significativas (McKillup, 2011). Estas pruebas son muy utilizadas en las PTARs donde se quiere comprobar si hay diferencias entre las distintas fases de la planta, en cuanto a parámetros fisicoquímicos, biológicos, etc. (Gad *et al.*, 2022).

La prueba de hipótesis para el análisis pareado de Wilcoxon es:

- H_0 = las diferencias entre los pares de observaciones de la población es igual a 0.
- H_1 = las diferencias entre los pares de observaciones de la población no es igual a 0.

Se realizaron cuatro pruebas de Wilcoxon utilizando los datos de las fases A y E, utilizando un nivel de significancia de 0.05. Los análisis por pares fueron los siguientes:

- Datos de MPs registrados en A de las PTARs pareados con los datos de MPs registrados en E de las PTARs. Objetivo: establecer si las diferencias del antes (afluente) y después (efluente) de MPs tiende a 0. Este análisis se realizó para los datos de ES y EL.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

- Datos de MPs registrados en A de las PTARs en ES pareados con los datos de MPs registrados en A de las PTARs en EL. Objetivo: establecer si las diferencias entre épocas tiende a 0.
- Datos de MPs registrados en E de las PTARs en ES pareados con los datos de MPs registrados en E de las PTARs en EL. Objetivo: establecer si las diferencias entre épocas tiende a 0.

Para establecer si existía una relación entre los datos de MPs y DQO registrados en las PTARs, se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman. Esta prueba no paramétrica se utiliza para medir la asociación entre dos variables discretas y oscila entre -1 y 1: valores próximos a 1 indican correlaciones positivas y fuertes; valores próximos -1 indican correlaciones negativas y fuertes; valores cercanos a 0 indican que no hay una correlación lineal (Tomás-Sábado, 2010). Además, se realizó una prueba de significancia para determinar si las correlaciones (positivas o negativas) eran significativas.

La prueba de hipótesis para la significancia de la correlación de Spearman es:

H_0 = El coeficiente de correlación no es significativamente diferente a 0. No existe una relación lineal significativa.

H_1 = El coeficiente de correlación es significativamente diferente a 0. Existe una relación lineal significativa.

Los análisis estadísticos fueron realizados en el programa RStudio versión 4.3.2. Este programa estadístico es de libre acceso.

8 Resultados y discusión

A continuación, se lleva a cabo un análisis de los resultados presentados, abordando su interpretación en relación con estudios previos y su importancia dentro del contexto investigado. Se examinan las variaciones en la morfología de las partículas, los hallazgos obtenidos a partir de la prueba de Wilcoxon y los espectros infrarrojos, resaltando posibles causas y patrones identificados. Además, se discuten las implicaciones de estos resultados y su contribución al conocimiento sobre la problemática estudiada.

8.1 Resultados

El siguiente apartado presenta los estudios estadísticos realizados con los datos obtenidos por medio de la metodología descrita. Esto incluye morfología de partículas, comprobación de hipótesis evaluando diferencias de par en par por el método Wilcoxon. Además, se incluyen los resultados obtenidos por espectroscopía infrarroja.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

8.1.1 Cuantificación de partículas

Esta sección presenta los resultados obtenidos en la cuantificación de microplásticos extraídos de las distintas plantas de tratamiento de aguas residuales analizadas. Se detallan las concentraciones encontradas en cada planta, así como las variaciones observadas en función de las estaciones climáticas estudiadas.

Tabla 2. Cantidad de MPs y su respectiva desviación estándar, en la entrada y salida de las PTAR estudiadas, así como el porcentaje de retención por planta.

PTAR	MPs en Afluente [MPs/L]	MPs en Efluente [MPs/L]	% Retención
ES-PT1-A	841 ± 219	127 ± 17	84.93%
ES-PT2-A	484 ± 201	153 ± 73	68.34%
ES-PT3-A	434 ± 244	152 ± 27	65.03%
ES-PT4-A	479 ± 182	70 ± 37	85.33%
EL-PT1-A	149 ± 004	152 ± 20	0%
EL-PT2-A	420 ± 218	225 ± 60	46.42%
EL-PT3-A	186 ± 051	85 ± 75	54.18%
EL-PT4-A	433 ± 386	151 ± 71	65.45%

8.1.2 Morfología de partículas

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

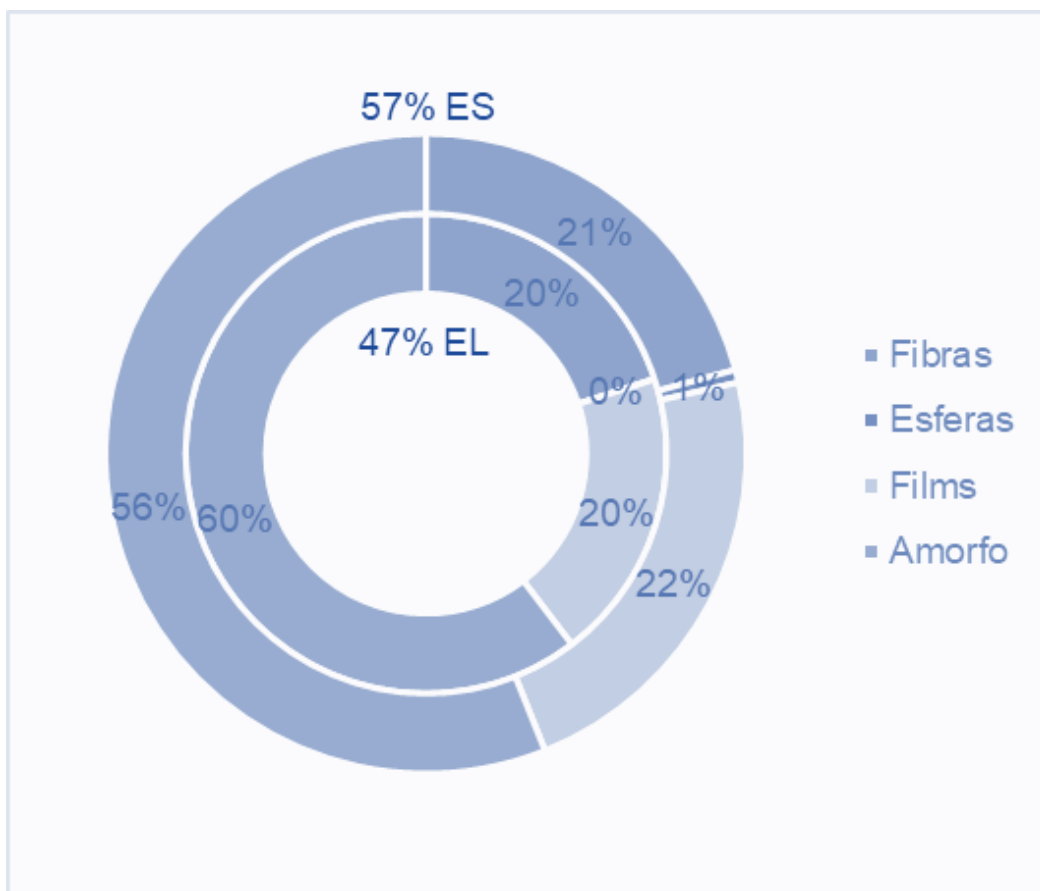


Figura I Gráfico circular, evidencia las proporciones de las diferentes categorías de morfología de la población según la época climática extraída. Gráfico generado por Microsoft Excel (Versión 2021) [Software de computadora].

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

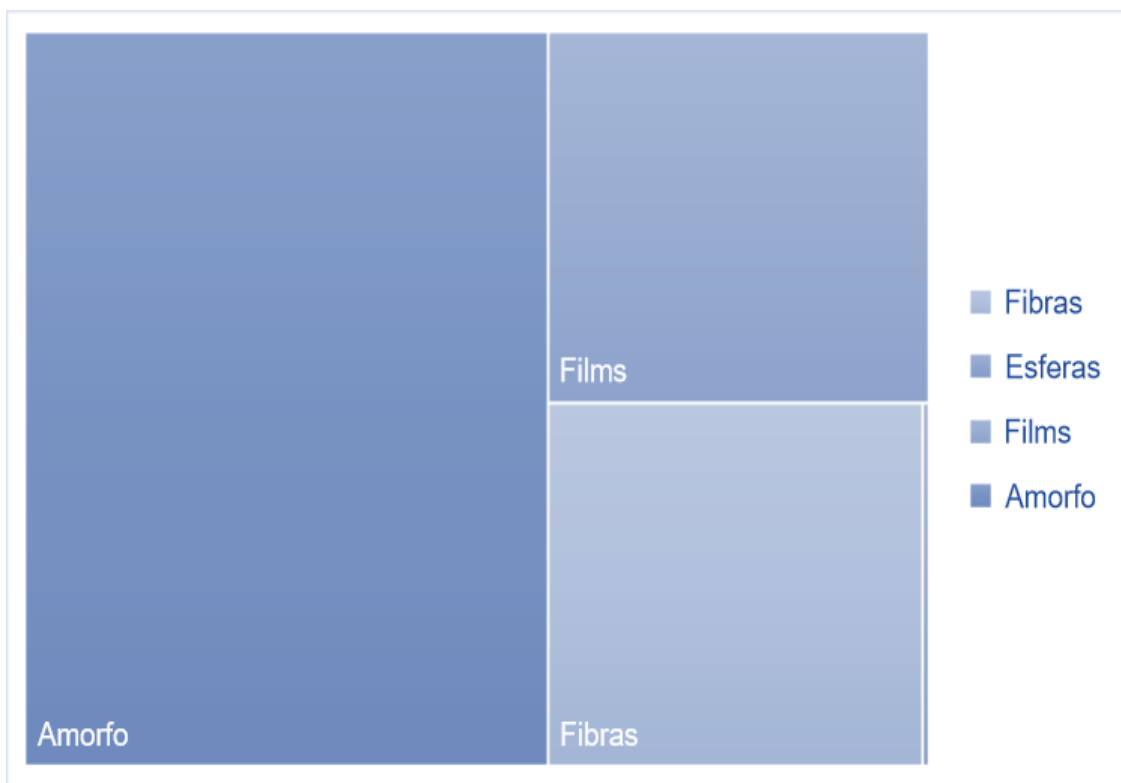


Figura II Gráfico de rectángulos, evidencia las proporciones de las diferentes categoría de morfología de la población completa de MPs extraídos. Gráfico generado por Microsoft Excel (Versión 2021) [Software de computadora].

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

8.1.3 Comportamiento de muestras según las fases de tratamiento.

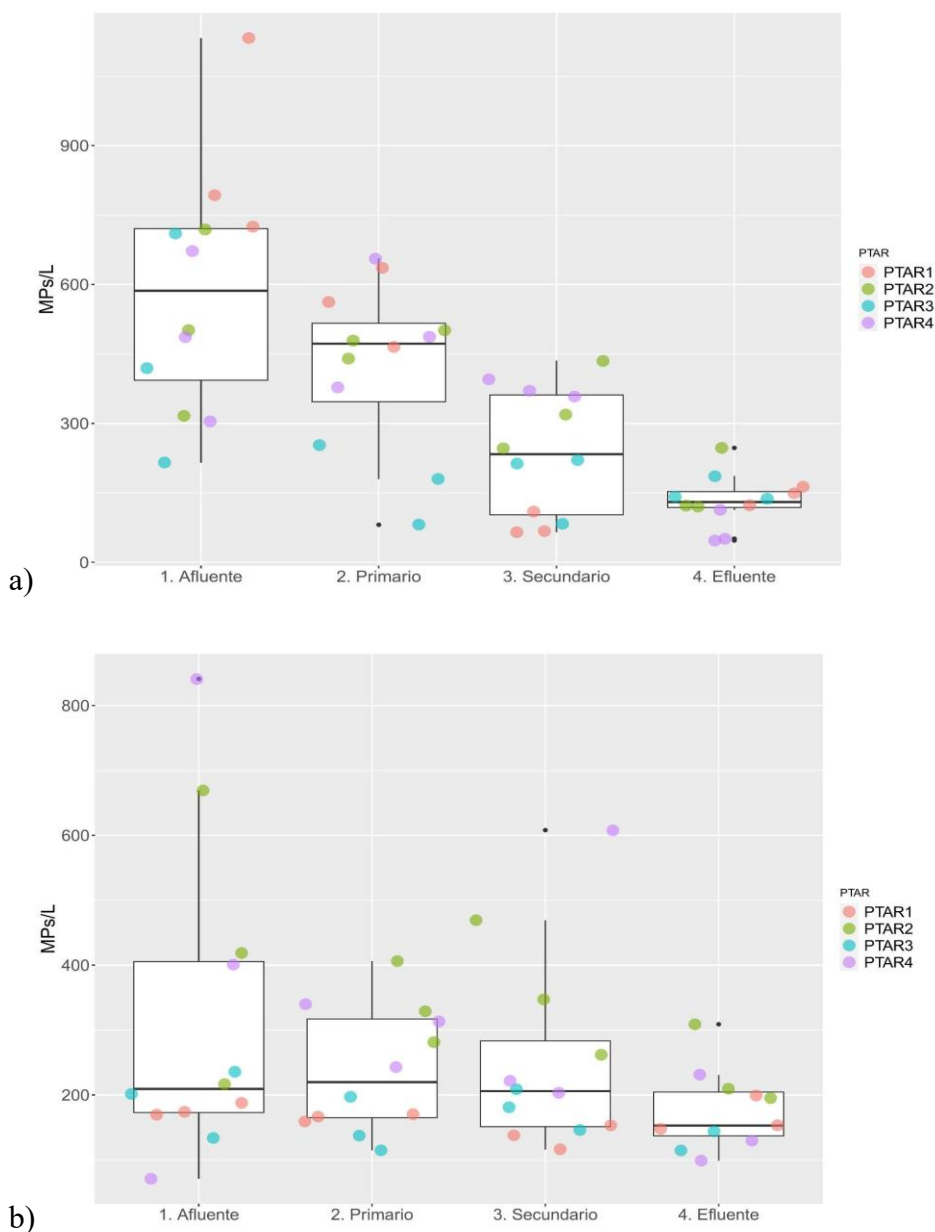


Figura III Gráficas de cuantil cuantil de los datos de microplásticos detectados y que corresponden a los afluentes para época seca y lluviosa (ESPTARA y ELPTARA) y de los efluentes para época seca y lluviosa (ESPTARE y ELPTARE).

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

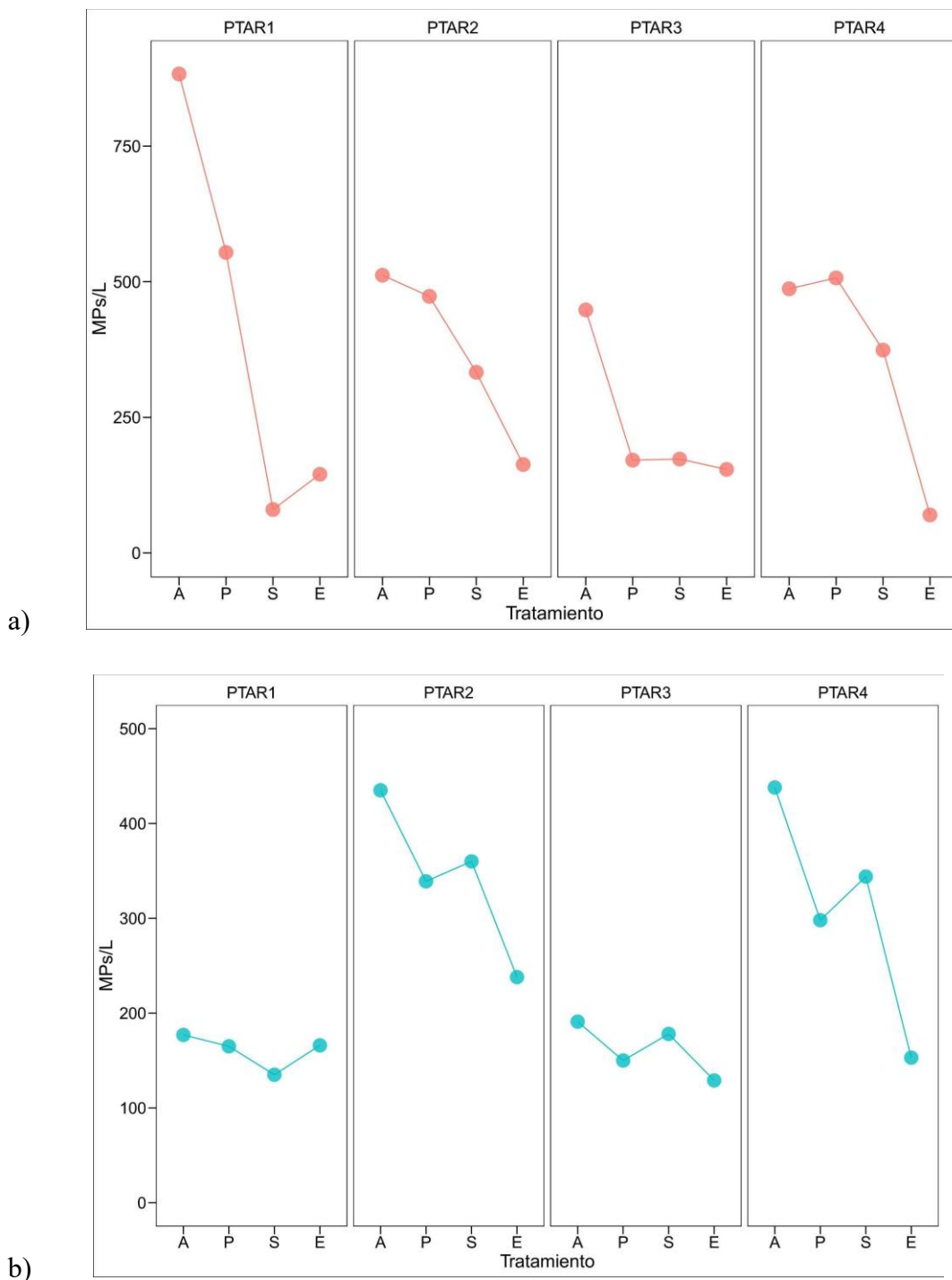


Figura IV Promedio de microplásticos (MPs) registrados en las cuatro fases evaluadas de las cuatro PTARs, correspondientes a la ES (a) y a la EL (b). (Fases evaluadas: A=Afluente, P=Tratamiento Primario, S=Tratamiento secundario, E=Efluente).

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

8.1.4 Prueba de Normalidad

En esta sección se presentan los resultados del análisis de normalidad de los datos, con el objetivo de determinar si siguen una distribución normal. Los diagramas de caja y gráficos de cuantil-cuantil (Q-Q plots) permitieron evaluar la alineación de los datos con la distribución teórica esperada, facilitando la identificación de posibles desviaciones. Los resultados obtenidos permitieron definir el enfoque estadístico adecuado para los análisis posteriores, diferenciando entre métodos paramétricos y no paramétricos según la distribución de los datos.

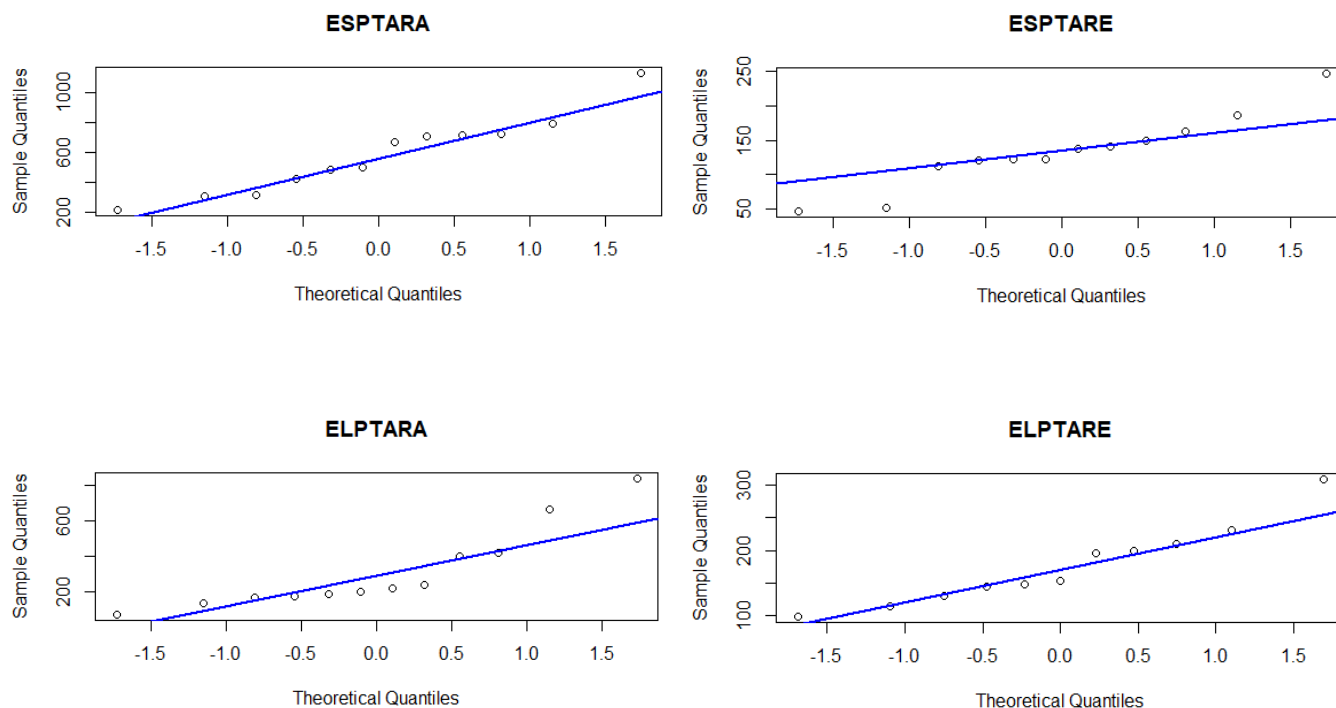


Figura V Gráficas de cuantil cuantil de los datos de microplásticos detectados y que corresponden a los afluentes para época seca y lluviosa (ESPTARA y ELPTARA) y de los efluentes para época seca y lluviosa (ESPTARE y ELPTARE).

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

8.1.5 Pruebas pareadas de Wilcoxon

En esta sección se presentan los resultados del análisis estadístico mediante la prueba de Wilcoxon para muestras relacionadas, utilizada para comparar distribuciones en datos que no siguen una distribución normal. Este análisis permitió evaluar si existen diferencias significativas entre los grupos de estudio, considerando la mediana de las diferencias en lugar de la media. Se incluyen los valores de la estadística de prueba, los niveles de significancia y la interpretación de los resultados en función de la hipótesis planteada, proporcionando así una visión detallada sobre las variaciones detectadas en los datos analizados.

Tabla 3. Resultados de análisis pareado de Wilcoxon utilizando datos de dos fases de las PTARs evaluadas (afluente y efluente) para las dos épocas climáticas (ES y EL). Valor de significancia de 0.05.

Análisis	Identificación	Prueba pareada de Wilcoxon Valor p
Análisis de Wilcoxon entre los datos registrados en los afluentes y efluentes de las PTARs evaluadas en ES.	ESPTARA - ESPTARE	0.0004883
Análisis de Wilcoxon entre los datos registrados en los afluentes y efluentes de las PTARs evaluadas en EL.	ELPTARA - ELPTARE	0.07522
Análisis de Wilcoxon entre los datos registrados en ES y EL de los afluentes de las PTARs evaluadas.	ESPTARA - ELPTARA	0.02286
Análisis de Wilcoxon entre los datos registrados en ES y EL de los efluentes de las PTARs evaluadas.	ESPTARE - ELPTARE	0.123

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

8.1.6 Correlación entre DQO y MPs

Tabla 4. Resultados de la prueba de correlación de Spearman aplicada a los datos obtenidos de microplásticos (MPs) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) registrados en las cuatro PTARs evaluadas. El nivel de significancia es de 0.05.

Coeficiente	Prueba de significancia (valor p)	S
-0.1047202	0.6995	751.21

8.1.7 Espectros IR

En esta sección se presentan los resultados de la caracterización de MPs mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Esta técnica permite identificar la composición química de los polímeros a partir de sus espectros de absorción característicos, facilitando la detección y clasificación de MPs en las muestras analizadas.

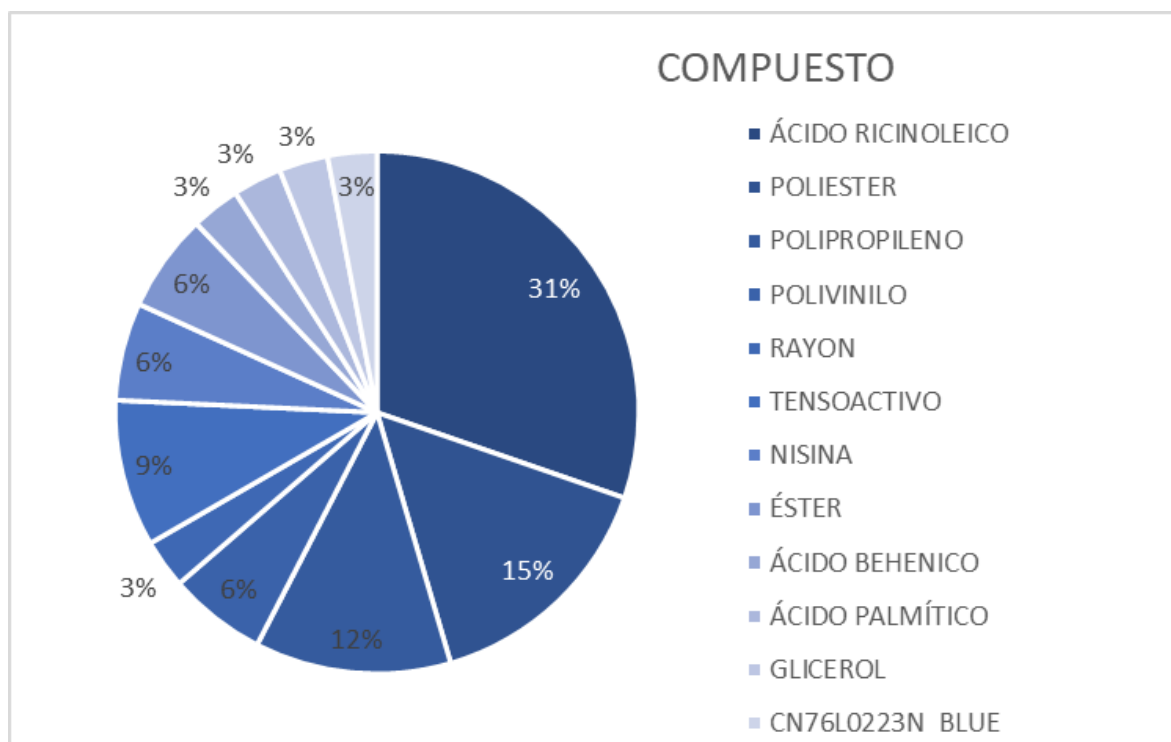


Figura VI. Diagrama circular de los compuestos caracterizados por medio de espectroscopía infrarroja, en el equipo FTIR modelo Frontier, Perkin Elmer.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

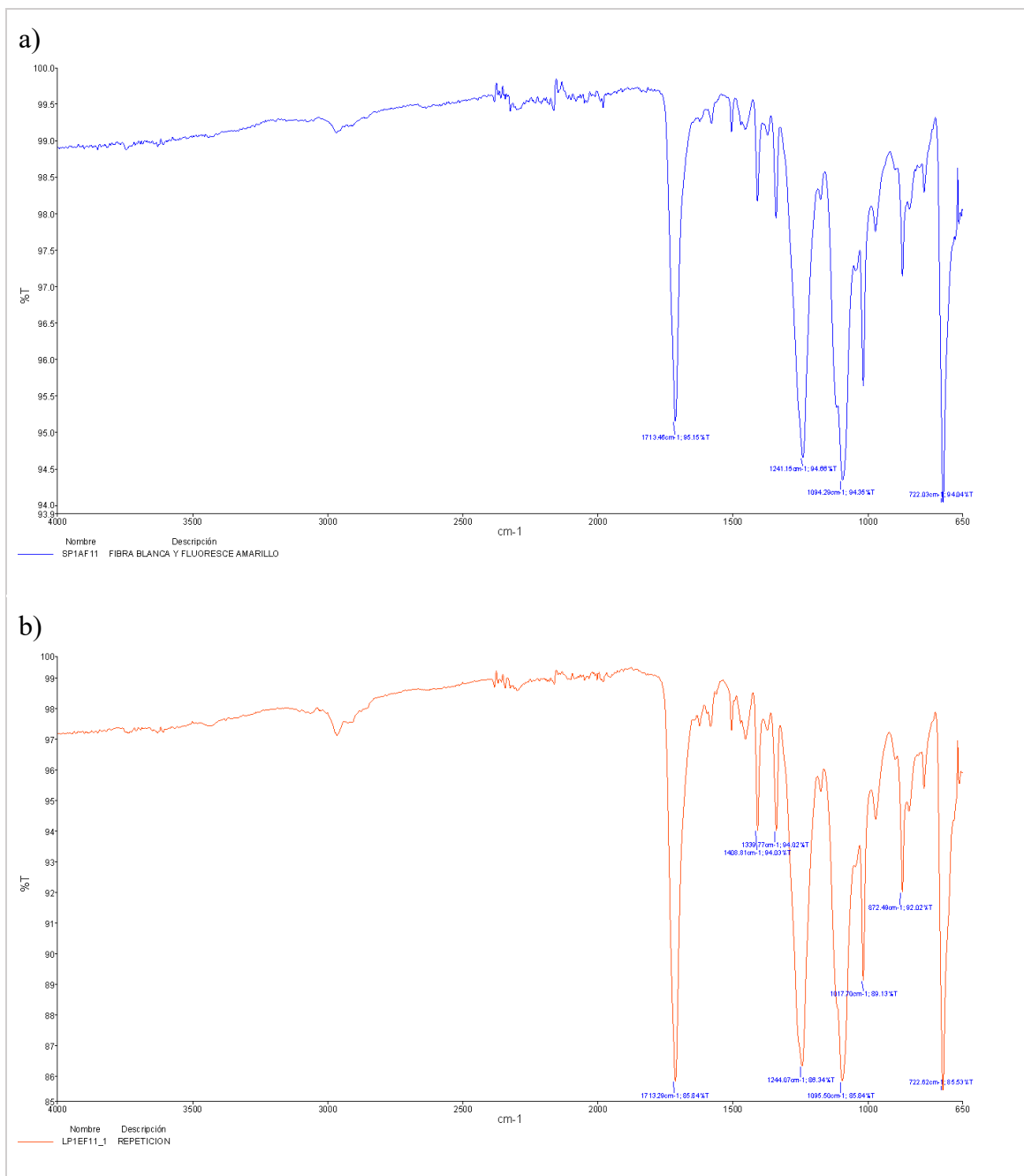


Figura VII. Espectros correspondientes a poliéster obtenidos de MPs extraídos en diferentes etapas y plantas de tratamiento, caracterizados por medio de espectroscopía infrarroja, en el equipo FTIR modelo Frontier, Perkin Elmer. a) Imagen correspondiente a muestra SP1AF11, corresponde a una fibra con superficie lisa, blanca que fluoresce amarillo. b) Imagen correspondiente a muestra LP1EF11, corresponde a una fibra gruesa, fluoresce verde.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

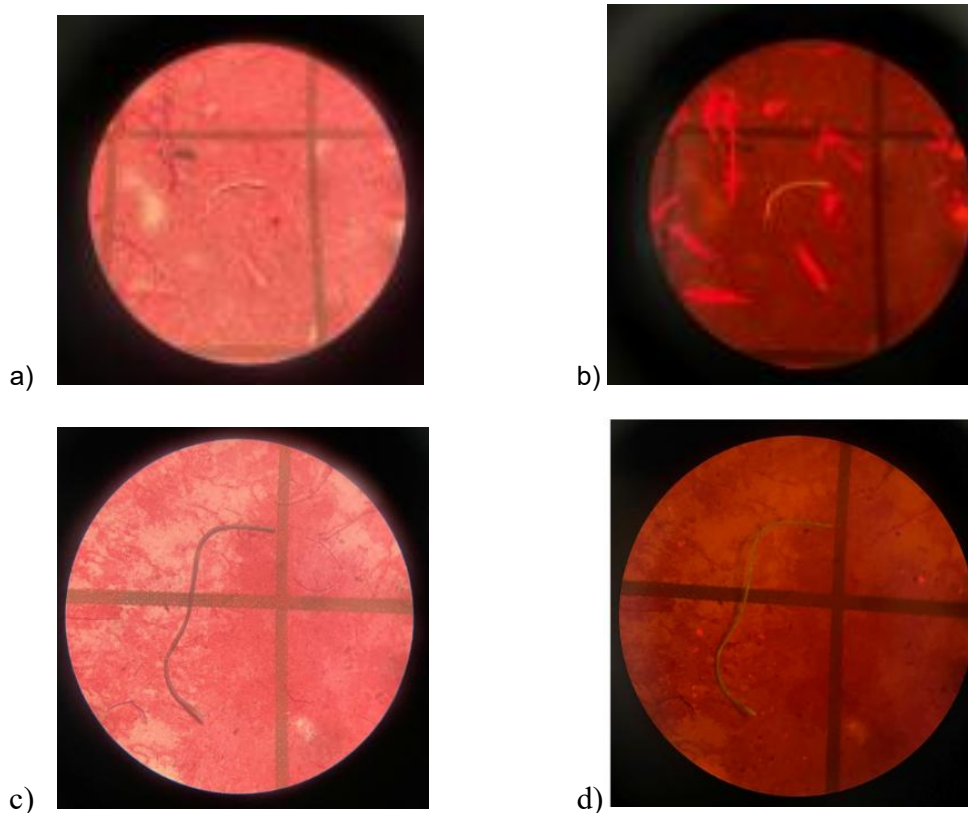


Figura VIII MPS bajo luz led y luz uv, correspondientes a Espectros de poliéster obtenidos de MPs extraídos en diferentes etapas y plantas de tratamiento. a) Imagen correspondiente a muestra SP1AF11, bajo luz normal. b) Imagen correspondiente a muestra SP1AF11, bajo luz UV. c) Imagen correspondiente a muestra LP1EF11, bajo luz normal. d) Imagen correspondiente a muestra LP1EF11, bajo luz UV.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

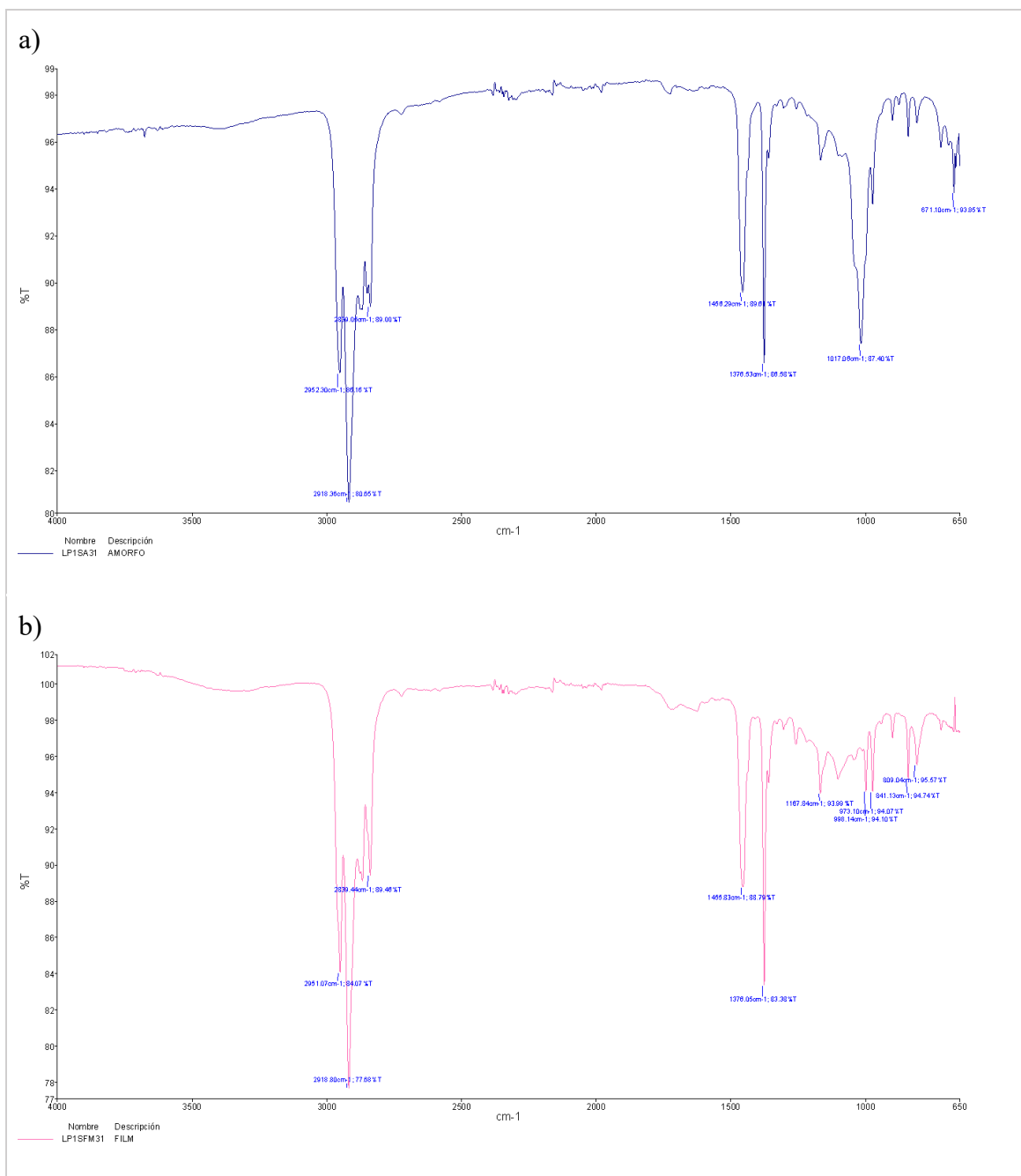


Figura IX Espectros correspondiente a polipropileno, obtenidos de MPs extraídos en diferentes etapas y plantas de tratamiento, caracterizados por medio de espectroscopía infrarroja, en el equipo FTIR modelo Frontier, Perkin Elmer. a) Imagen correspondiente a muestra LP1SA31, corresponde a un amorfo negro, no fluorescente. b) Imagen

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

correspondiente a muestra LP1SFM31, corresponde a un film liso, de apariencia uniforme traslucido, fluoresce amarillo.

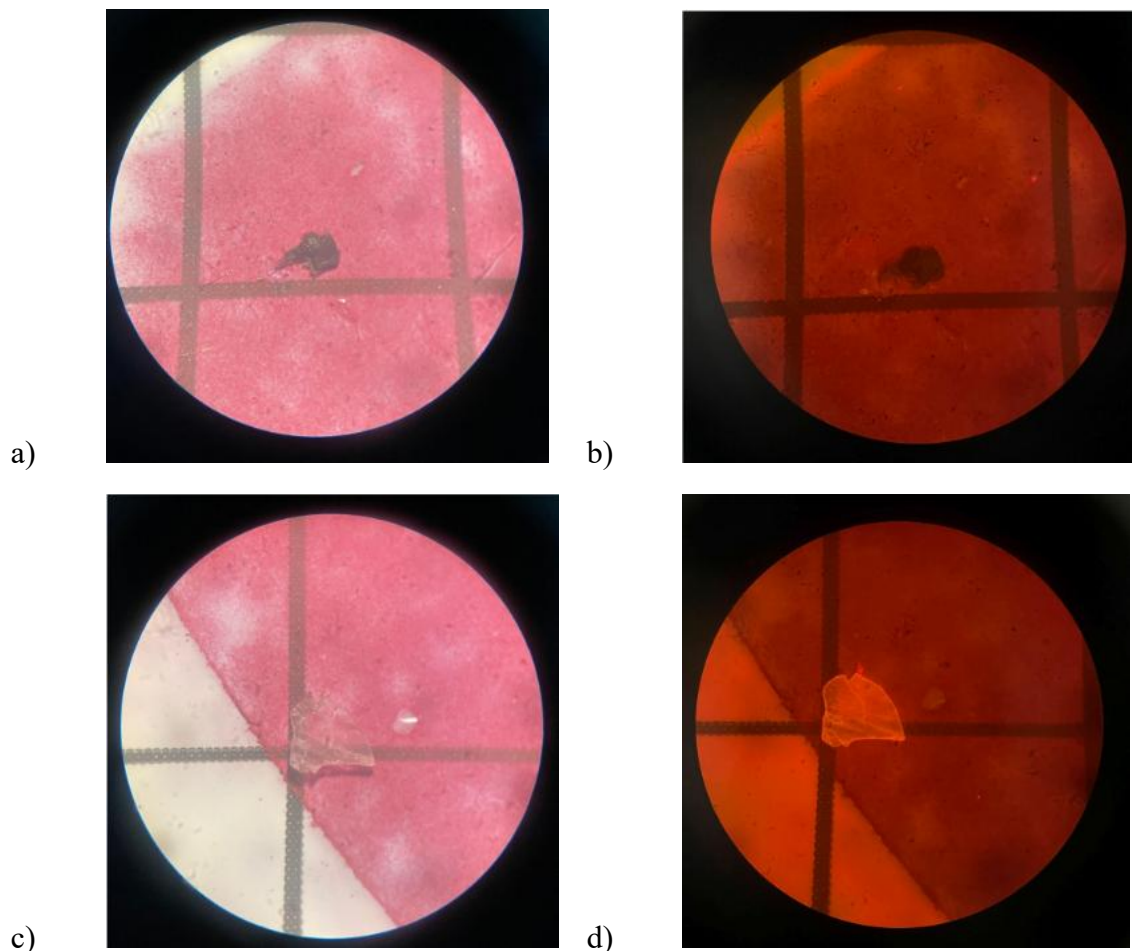


Figura X MPS bajo luz led y luz uv, correspondientes a Espectros de polipropileno obtenidos de MPs extraídos en diferentes etapas y plantas de tratamiento. a) Imagen correspondiente a muestra LP1SA31, bajo luz normal. b) Imagen correspondiente a muestra LP1SA31, bajo luz UV. c) Imagen correspondiente a muestra LP1SA31, bajo luz normal. d) Imagen correspondiente a muestra LP1SA31, bajo luz UV.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

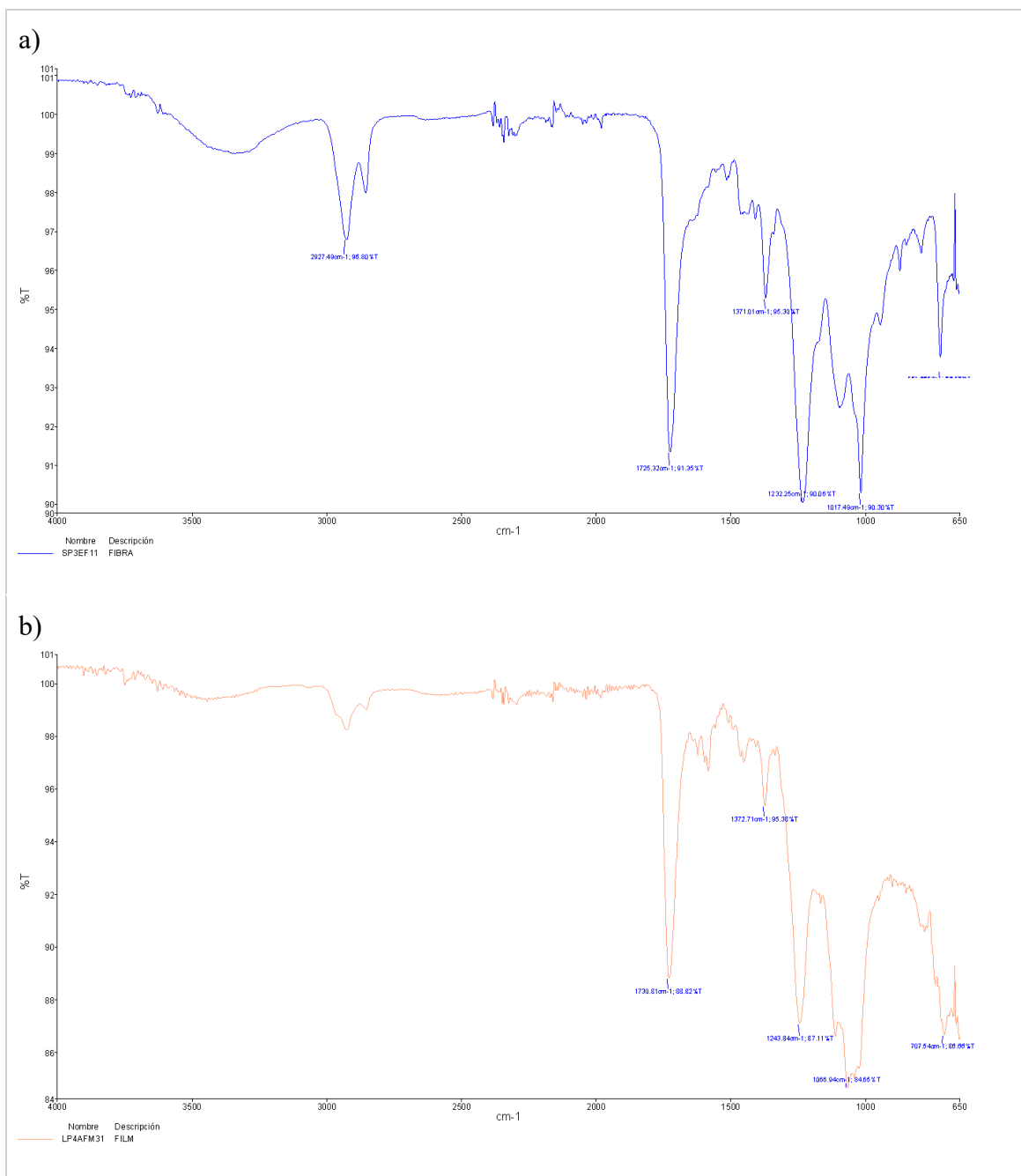


Figura XI Espectros correspondiente a polivinilo, obtenidos de MPs extraídos en diferentes etapas y plantas de tratamiento, caracterizados por medio de espectroscopía infrarroja, en el equipo FTIR modelo Frontier, Perkin Elmer. a) Imagen correspondiente a muestra SP3EF11, corresponde a un cúmulo de fibras. b) Imagen correspondiente a muestra LP4AFM31, corresponde a un film azul densa, no fluorescente.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

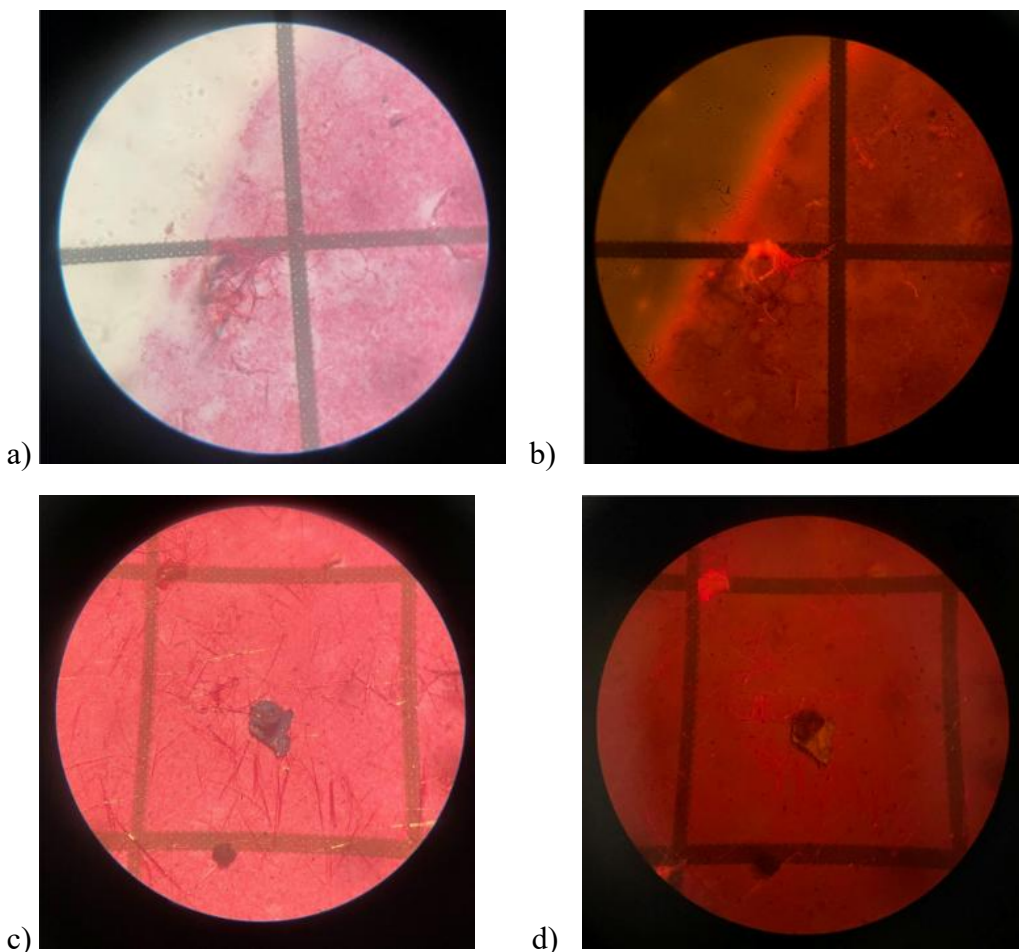


Figura XII MPS bajo luz led y luz uv, correspondientes a espectros de polivinilo obtenidos de MPs extraídos en diferentes etapas y plantas de tratamiento. a) Imagen correspondiente a muestra SP3EF11, bajo luz normal. b) Imagen correspondiente a muestra SP3EF11, bajo luz UV. c) Imagen correspondiente a muestra LP4AFM31, bajo luz normal. d) Imagen correspondiente a muestra LP4AFM31, bajo luz UV.

8.2 Discusión de resultados

Komorowska-Kaufman and Marciniak (2024) confirman que la investigación sobre MPs ha crecido exponencialmente. El agua es uno de los principales transportes de MPs, especialmente el agua residual que acarrea desechos de diferente naturaleza polimérica. Entre los parámetros estadísticos determinados en este estudio se encuentra el rango de partículas encontradas en la entrada y salida de las plantas de tratamiento detalladas en la tabla II, con un máximo de 841 MPs/L en el afluente y un máximo de 225 MPs/L en el efluente.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Las aguas residuales contienen diferente concentración de MPs, según investigaciones de diferentes países. Long, Z. Et al. (2019) encontró en el afluente MPs en un rango de 1.57–13.69 MPs/L. Sin embargo, otros estudios han encontrado hasta 18285 MPs/L (Simon, M., van Alst, N., y Vollertsen, J, 2018). Por lo tanto, se infiere que la cantidad en la entrada depende de la región y el origen de las aguas residuales.

Los MPs extraídos de las plantas de tratamiento de aguas tuvieron diversa morfología, clasificada en el estudio como: fibras, esferas, films y amorfos. La distribución se puede encontrar en la Figura I, siendo en una mayor proporción amorfos en ambas estaciones climáticas. En la figura II se observa un panorama completo, en el que las partículas esféricas no son representativas a comparación de las otras categorías.

La variabilidad de MPs presentes en las PTAR disminuyen conforme las etapas del tratamiento. En la figura III, se observa que la mediana y la dispersión de MPS/L disminuyen a medida que avanza el tratamiento, indicando una reducción en partículas. En época seca (figura III-a) los valores están más dispersos, especialmente en la etapa del afluente y el tratamiento primario. Por el contrario, en época lluviosa las cajas son generalmente más compactas, indicando mayor precisión. Sin embargo, se observan más outliers en época lluviosa, lo que sugiere que las lluvias introducen mayor variabilidad en la presencia de MPs.

Cristaldi et al., (2020), encontró una eficiencia de eliminación de MPS del 58%. Se comprueba el comportamiento en el estudio actual, la cantidad de MPs a través de la planta de tratamiento tiende a disminuir. En general, desde la fase A hasta la fase E, todas las plantas presentaron una disminución de MPs (figura IV). Las PTAR a pesar de no estar diseñadas para retener MPs son efectivas según los datos obtenidos con un máximo de 85% de efectividad.

Las pruebas de estadística inferencial requieren pruebas previas de normalidad, las cuales se realizaron con gráficas de cuantil- cuantil (Q-Q) como se muestra en la figura V. Los datos de microplásticos en los afluentes muestran algunas desviaciones respecto a la normalidad, especialmente en los extremos. Por lo tanto, se procedió con estudios no paramétrico.

La prueba de Wilcoxon para un nivel de significancia del 5 %, indica si existe diferencia significativa entre la media de diferentes grupos. En la tabla 3, se encuentran los resultados para las pruebas realizadas, denotando una diferencia significativa entre los pares ESPTARA - ESPTARE, por lo que existe una remoción significativa entre el afluente y efluente en época seca. El estudio entre ESPTARA y ELPTARA, también presenta una diferencia significativa, es decir existe diferencia en presencia de MPs entre el afluente en época seca y época lluviosa.

En época lluviosa, los trabajadores de la planta interrumpen el ingreso de afluente durante la noche para evitar que el caudal supere la capacidad de la instalación, reduciendo así el riesgo de inundaciones que podrían comprometer la seguridad de la PTAR y de su personal.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Además, debido a que las plantas están al aire libre, las precipitaciones se incorporan al caudal, diluyendo la concentración de MPS analizados. Estas condiciones explican el comportamiento de los datos observados tanto en el diagrama de cajas como en la prueba de Wilcoxon.

La correlación entre MPs y DQO se evaluó por medio del coeficiente de correlación de Spearman. El coeficiente (tabla 4) es negativo, lo que sugiere una correlación inversa muy débil entre DQO y la concentración de MPs. La información se confirma con la prueba de significancia, por lo que no hay suficiente evidencia para afirmar que existe una relación real entre DQO y microplásticos en los datos analizados.

Los resultados de la caracterización de microplásticos (MPs) mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) se presentan en la Figura VI. Se identificó la composición polimérica en el 33 % de las muestras analizadas, correspondiendo principalmente a poliéster (PET), polipropileno (PP), polivinilo (PVC) y rayón.

Asimismo, en un 31 % de las muestras se detectó ácido ricinoleico, lo que sugiere la presencia de residuos de origen lipídico. Este fenómeno se correlaciona con las partículas que mostraron una mayor absorción del colorante rojo Nilo, un comportamiento atribuible a la similitud en la afinidad de este colorante tanto por grasas como por ciertos polímeros.

El análisis espectral confirmó los picos característicos de los polímeros identificados. En el caso del poliéster (PET), figura VII, se observaron bandas representativas en 1713 cm^{-1} (C=O, carbonilo de éster), 1243 cm^{-1} y 1095 cm^{-1} (C-O de éster), 872 cm^{-1} y 722 cm^{-1} (deformaciones fuera del plano de C-H aromático). Sin embargo, en algunas muestras se registraron señales adicionales, como en 1339 cm^{-1} y 1017 cm^{-1} , que podrían estar asociadas con aditivos, impurezas o copolímeros.

La figura VIII muestra los espectros obtenidos correspondientes a polipropileno. Los espectros obtenidos revelan la presencia predominante de poliolefinas, principalmente polipropileno (PP), con características espectrales bien definidas en 2951 , 2918 , 2839 , 1455 y 1376 cm^{-1} , correspondientes a los estiramientos y deformaciones de los enlaces C-H de grupos $-\text{CH}_2-$ y $-\text{CH}_3$ (Peltzer y Simoneau, 2000). No obstante, la presencia de bandas en 1167 cm^{-1} podría indicar la existencia de aditivos, impurezas o modificaciones estructurales en el polímero. Estos hallazgos refuerzan la identificación de microplásticos de polipropileno en las muestras analizadas, probablemente derivados de residuos industriales, envases plásticos o textiles sintéticos.

Los espectros en la figura IX, confirman la presencia de polímeros basados en polivinilo, presentando bandas características en 2900 cm^{-1} (estiramiento C-H), 1315 cm^{-1} (deformación C-H) y 896 cm^{-1} (deformación fuera del plano C-H, estructura vinílica). Por otro lado, el PVA, empleado en adhesivos y recubrimientos solubles en agua, se distingue por una fuerte absorción en 3332 cm^{-1} (O-H), 1160 cm^{-1} (C-O-C) y 1029 cm^{-1} (C-O) (Peltzer y Simoneau,

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

2000). La identificación de estos polímeros en las muestras sugiere una posible contaminación derivada de plásticos industriales, adhesivos y recubrimientos solubles.

Estos resultados refuerzan la presencia de microplásticos en el medio analizado y sugieren posibles interacciones con compuestos orgánicos, como ácidos grasos, lo que podría influir en su comportamiento en el ambiente y su impacto en los ecosistemas acuáticos.

9 Beneficiarios directos e indirectos

Tabla 2. Beneficiarios directos e indirectos de la investigación

Resultados, productos o hallazgos	Beneficiarios directos (institución, organización, sector académico o tipo de personas)	Número de beneficiarios directos	Beneficiarios indirectos (institución, organización, sector académico o tipo de personas)	Número de Beneficiarios indirectos
Confirmación de la presencia de microplásticos. Retención de microplásticos en cada etapa de tratamiento, emisiones de microplásticos al río Villalobos	Municipalidad de Villanueva	300	Población aledaña al río Villalobos	10,000
Información sobre microplásticos, fuentes, y posibles orígenes	Investigadores USAC	100	Estudiantes	10,000

10 Estrategia de divulgación y difusión de los resultados

Describe con evidencia en la tabla 3 las actividades realizadas. Marque con una X las actividades que realizó. Dependiendo de la investigación agregue otras actividades.

Tabla 3

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

RECURSO	Sí	No
Presentación TV		X
Entrevistas radiales	X	
Podcast	X	
Entrevista DIGI	X	
Recursos audiovisuales	X	
Congresos científicos nacionales o internacionales	X	
Talleres		X
Publicación de libro		X
Publicación de artículo científico	X	
Divulgación por redes sociales institucionales	X	
Presentación pública		X
Presentación autoridades USAC		X
Presentación a beneficiarios directos		X
Entrega de resultados	X	
Docencia en grado		X
Docencia postgrado		X
Póster científico		X
Trifoliales		X
Conferencias		X
Otro (describa)		X

10.1 Contribución a las Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND)

Los resultados de esta investigación contribuyen a las metas del Plan Nacional de Desarrollo (PND) de Guatemala en cuanto a la gestión del agua y saneamiento ambiental. La cuantificación de MPS en aguas residuales antes y después del tratamiento proporciona información clave para evaluar la eficiencia de las PTARs. Estos hallazgos son esenciales para la formulación de estrategias que optimicen los procesos de remoción de contaminantes

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

emergentes y fortalezcan la infraestructura de saneamiento, alineándose con los objetivos nacionales de mejorar la calidad del agua y reducir la contaminación hídrica.

Además, al comparar los niveles de microplásticos en distintas etapas del tratamiento, se evidenció que los sistemas convencionales no eliminan completamente estos contaminantes, lo que podría representar un riesgo ambiental y para la salud pública. Esta información es relevante para las políticas de protección de ecosistemas acuáticos, ya que facilita la toma de decisiones sobre estrategias de mitigación y monitoreo. Asimismo, el análisis de la variabilidad estacional en la concentración de microplásticos permite anticipar tendencias de contaminación y fortalecer la resiliencia del sistema de saneamiento ante cambios climáticos.

Finalmente, la relación entre la DQO y la concentración de MPS en las aguas residuales brinda una nueva perspectiva sobre la interacción entre contaminantes orgánicos y emergentes. Este conocimiento es clave para mejorar los indicadores de calidad del agua, permitiendo a las autoridades y operadores de PTARs implementar medidas más eficientes para la reducción de contaminación. En conjunto, estos aportes científicos respaldan la necesidad de actualizar normativas ambientales y promover acciones que favorezcan un desarrollo sostenible en Guatemala.

10.2 Vinculación

La presente investigación ha recibido un importante apoyo por parte de la Municipalidad de Villa Nueva, que facilitó el acceso a las plantas de tratamiento de aguas residuales, además de proporcionar información detallada sobre los procesos y métodos utilizados en el tratamiento de las aguas. Este acceso fue crucial para el desarrollo del estudio, permitiendo la extracción de MPs presentes en diferentes puntos del sistema de tratamiento.

Asimismo, se estableció una colaboración con el Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas de la Universidad Mariano Gálvez, que desempeñó un papel fundamental en la confirmación de la naturaleza polimérica de los microplásticos (MPs) obtenidos durante la investigación. Como resultado de esta colaboración, se acordó la publicación conjunta de un artículo científico, el cual reflejará los hallazgos y avances obtenidos en el estudio, contribuyendo al conocimiento científico en el área.

Describa de qué forma realizó vinculaciones con otras instituciones, comunidades u organizaciones sociales externas a la USAC, académicas, científicas, gubernamentales, de cooperación, asociaciones o gremios de Mipymes o empresariales, si procede dar los créditos pertinentes. Indique cómo entregará y compartirá los resultados con las mencionadas organizaciones; si procede dar los créditos correspondientes.

11 Conclusiones

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

- Se confirmó la presencia de MPs en todas las fases del proceso de tratamiento de aguas residuales. Con una concentración máxima de 841 MPs/L en el afluente y un máximo de 225 MPs/L en el efluente.
- La concentración de MPs fue mayor en el afluente, con una disminución progresiva en cada etapa del tratamiento. La reducción de MPs alcanzó hasta un 85% en algunas plantas de tratamiento, lo que sugiere que, a pesar de no estar diseñadas específicamente para su eliminación, las PTARs pueden retener una parte considerable de estas partículas.
- Se observó una reducción significativa de MPs en cada etapa del tratamiento, siendo el tratamiento secundario el más efectivo en la retención de estas partículas. Sin embargo, los resultados sugieren que una proporción considerable de MPs sigue presente en el efluente, lo que implica que estas partículas pueden continuar su trayectoria hacia los cuerpos de agua receptores.
- Existe evidencia estadística de la diferencia en la cantidad de MPs obtenidas entre estaciones: seca y lluviosa. Durante la época lluviosa, la dilución del agua y las prácticas operativas de las PTARs, como la interrupción del ingreso de afluente durante la noche, afectan la concentración de microplásticos, resultando en una menor concentración promedio y mayor variabilidad en los datos.
- Se encontró una correlación inversa muy débil entre la cantidad de MPS y la (DQO), lo que sugiere que la presencia de MPs en el agua residual no existe evidencia estadística suficiente para determinar la relación entre ambas variables.
- La composición polimérica sugiere que los MPs identificados provienen de diversas fuentes, incluyendo textiles sintéticos, envases plásticos y materiales industriales. Además, la detección de ácido ricinoleico en algunas muestras sugiere la presencia de residuos de origen lipídico, lo que podría influir en la interacción de los MPs con otros compuestos orgánicos presentes en el agua residual.

12 Recomendaciones

El presente estudio ha permitido identificar importantes brechas de conocimiento en la remoción de microplásticos (MPs) dentro de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), destacando la necesidad de mejorar los procesos actuales para minimizar su liberación al medio ambiente. A partir de los hallazgos obtenidos, se proponen las siguientes recomendaciones:

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Fortalecimiento del marco legal para la regulación de microplásticos:

Es fundamental desarrollar y fortalecer el marco normativo relacionado con la presencia y control de microplásticos en cuerpos de agua. Adicionalmente, es necesario fomentar la adhesión a convenios internacionales sobre contaminación por plásticos, así como fortalecer el marco legal de residuos sólidos para minimizar la generación de plásticos de un solo uso y promover alternativas biodegradables. La implementación de auditorías ambientales y el monitoreo constante de microplásticos en cuerpos de agua pueden contribuir significativamente a la mitigación de este problema.

Fortalecimiento de la investigación en remoción de microplásticos en PTARs

A nivel global, la remoción de microplásticos sigue siendo un desafío, ya que los procesos convencionales se enfocan en la reducción de materia orgánica y contaminantes químicos, pero no en partículas de plástico de tamaño reducido (Sedlak, 2017). Los procesos en las PTARs actuales están diseñados para eliminar partículas de mayor tamaño y densidad. Sin embargo, los MPs presentan características que les permiten evadir estos procesos de remoción, especialmente aquellos de baja densidad (Horton & Dixon, 2018).

Es recomendable fomentar investigaciones dirigidas a desarrollar e implementar tecnologías específicas para la captura y eliminación de microplásticos en plantas de tratamiento. Así también, evaluar la implementación de nuevas estrategias para un reacondicionamiento de las PTAR enfocados en la retención de MPs.

Medidas preventivas a nivel doméstico e industrial

Dado que los MPs pueden originarse en entornos domésticos e industriales, se recomienda promover la concienciación sobre su impacto ambiental y fomentar el uso de alternativas sostenibles. Investigaciones previas han señalado que los cosméticos, productos de limpieza y textiles sintéticos son fuentes importantes de MPs (van Wezel et al., 2016; De Falco et al., 2019). En este contexto, se sugiere fortalecer regulaciones para la reducción de MPs en productos de consumo y mejorar los sistemas de filtración en la industria.

Estudio estadístico robusto para un indicador de MPs en cuerpos de agua.

Dado que la DQO es una variable comúnmente medida en los procesos de tratamiento de aguas, se recomienda evaluar su posible correlación con la concentración de MPs. Este enfoque podría proporcionar un método indirecto para estimar la presencia de MPs sin necesidad de análisis complejos y costosos.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

13 Referencias

- An, L., Liu, Q., Deng, Y., Wu, W., Gao, Y., & Ling, W. (2020). Sources of Microplastic in the Environment. En D. He & Y. Luo (Eds.), *Microplastics in Terrestrial Environments: Emerging Contaminants and Major Challenges* (pp. 143-159). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/698_2020_449
- Au, S. Y., Bruce, T. F., Bridges, W. C., & Klaine, S. J. (2015). Responses of *Hyalella azteca* to acute and chronic microplastic exposures. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 34(11), 2564-2572. <https://doi.org/10.1002/etc.3093>
- Avio, C. G., Gorbi, S., & Regoli, F. (2017). Plastics and microplastics in the oceans: From emerging pollutants to emerged threat. *Marine Environmental Research*, 128, 2-11. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.05.012>
- Bao, M., Xiang, X., Huang, J., Kong, L., Wu, J., & Cheng, S. (2023). Microplastics in the Atmosphere and Water Bodies of Coastal Agglomerations: A Mini-Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/ijerph20032466>
- Barboza, L. G. A., Dick Vethaak, A., Lavorante, B. R. B. O., Lundebye, A.-K., & Guilhermino, L. (2018). Marine microplastic debris: An emerging issue for food security, food safety and human health. *Marine Pollution Bulletin*, 133, 336-348. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.05.047>
- Ben-David, E. A., Habibi, M., Haddad, E., Hasanin, M., Angel, D. L., Booth, A. M., & Sabbah, I. (2021). Microplastic distributions in a domestic wastewater treatment plant: Removal efficiency, seasonal variation and influence of sampling technique. *Science of The Total Environment*, 752, 141880. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141880>
- Carr, S. A., Liu, J., & Tesoro, A. G. (2016). Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants. *Water Research*, 91, 174-182. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.01.002>
- Chakraborty, P., Chandra, S., Dimmen, M. V., Hurley, R., Mohanty, S., Bharat, G. K., Steindal, E. H., Olsen, M., & Nizzetto, L. (2022). Interlinkage Between Persistent Organic Pollutants and Plastic in the Waste Management System of India: An Overview. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 109(6), 927-936. <https://doi.org/10.1007/s00128-022-03466-x>
- Cole, M., Webb, H., Lindeque, P. K., Fileman, E. S., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2014). Isolation of microplastics in biota-rich seawater samples and marine organisms. *Scientific Reports*, 4(1), 4528. <https://doi.org/10.1038/srep04528>

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

- Coppock, R. L., Cole, M., Lindeque, P. K., Queirós, A. M., & Galloway, T. S. (2017). A small-scale, portable method for extracting microplastics from marine sediments. *Environmental Pollution*, 230, 829-837. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.017>
- Cristaldi, A., Fiore, M., Zuccarello, P., Oliveri Conti, G., Grasso, A., Nicolosi, I., Copat, C., & Ferrante, M. (2020). Efficiency of Wastewater Treatment Plants (WWTPs) for Microplastic Removal: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(21), Article 21. <https://doi.org/10.3390/ijerph17218014>
- Cruz Ccenhua, G. B. (2022). Evaluación del impacto de los desechos de pvc en la bahía de carquín de la provincia de Huaura y su reutilización. <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/7099>
- De Falco, F., Di Pace, E., Cocca, M., & Avella, M. (2019). The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution. *Scientific Reports*, 9(1), 6633. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43023-x>
- Eerkes-Medrano, D., Thompson, R. C., & Aldridge, D. C. (2015). Microplastics in freshwater systems: A review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs. *Water Research*, 75, 63-82. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.012>
- Field, A., & Miles, J. (2010). *Discovering statistics using SAS*. Sage Publications.
- Fu, L., Li, J., Wang, G., Luan, Y., & Dai, W. (2021). Adsorption behavior of organic pollutants on microplastics. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 217, 112207. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112207>
- Horton, A. A., & Dixon, S. J. (2018). Microplastics: An introduction to environmental transport processes. *WIREs Water*, 5(2), e1268. <https://doi.org/10.1002/wat2.1268>
- Gad, M., Abdo, S. M., Hu, A., El-Liethy, M. A., Hellal, M. S., Doma, H. S., & Ali, G. H. (2022). Performance assessment of natural wastewater treatment plants by multivariate statistical models: a case study. *Sustainability* 14(13), 7658.
- Gbogbo, F., Takyi, J. B., Billah, M. K., & Ewool, J. (2020). Analysis of microplastics in wetland samples from coastal Ghana using the Rose Bengal stain. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(4), 208. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8175-8>
- Jaikumar, G., Brun, N. R., Vijver, M. G., & Bosker, T. (2019). Reproductive toxicity of primary and secondary microplastics to three cladocerans during chronic exposure. *Environmental Pollution*, 249, 638-646. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.085>

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

- Jiang, X., Chen, W., & Zhang, Z. (2020). Removal efficiency of microplastics in wastewater treatment plants: A review. *Science of the Total Environment*, 747, 141-148. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141148>
- Kay, P., Hiscoe, R., Moberley, I., Bajic, L., & McKenna, N. (2018). Wastewater treatment plants as a source of microplastics in river catchments. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(20), 20264-20267. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2070-7>
- Komorowska-Kaufman, M., & Marciniak, W. (2024). Removal of microplastic particles during municipal wastewater treatment: a current review. *Desalination and Water Treatment*, <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100006>
- Li, X., Shen, X., Jiang, W., Xi, Y., & Li, S. (2024). Comprehensive review of emerging contaminants: Detection technologies, environmental impact, and management strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 278, 116420.
- Li, W., Zu, B., Yang, Q., Huang, Y., & Li, J. (2022). Adsorption of lead and cadmium by microplastics and their desorption behavior as vectors in the gastrointestinal environment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107379. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107379>
- Liu, S., Huang, J., Zhang, W., Shi, L., Yi, K., Yu, H., Zhang, C., Li, S., & Li, J. (2022). Microplastics as a vehicle of heavy metals in aquatic environments: A review of adsorption factors, mechanisms, and biological effects. *Journal of Environmental Management*, 302, 113995. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113995>
- Long, Z., Pan, Z., Wang, W., Ren, J., Yu, X., Lin, L., Lin, H., Chen, H., & Jin, X. (2019). Microplastic abundance, characteristics, and removal in wastewater treatment plants in a coastal city of China. *Water Research*, 155, 255-265. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.028>
- López-Rosales, A., Andrade, J. M., Grueiro-Noche, G., Fernández-González, V., López-Mahía, P., & Muniategui-Lorenzo, S. (2021). Development of a fast and efficient method to analyze microplastics in planktonic samples. *Marine Pollution Bulletin*, 168, 112379. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112379>
- Maes, T., Jessop, R., Wellner, N., Haupt, K., & Mayes, A. G. (2017). A rapid-screening approach to detect and quantify microplastics based on fluorescent tagging with Nile Red. *Scientific Reports*, 7(1), 44501. <https://doi.org/10.1038/srep44501>
- Marsden, P., Koelmans, A. A., Bourdon-Lacombe, J., Gouin, T., Anglada, L. D., Cunliffe, D., Jarvis, P., Fawell, J., & France, J. D. (2019). Microplastics in drinking water (p.). World Health Organization. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/553048>

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

- Mason, S. A., Garneau, D., Sutton, R., Chu, Y., Ehmann, K., Barnes, J., Fink, P., Papazissimos, D., & Rogers, D. L. (2016). Microplastic pollution is widely detected in US municipal wastewater treatment plant effluent. *Environmental Pollution*, 218, 1045-1054. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.056>
- Masura, J., Baker, J., Foster, G., & Arthur, C. (2015). Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment: Recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. [Report]. NOAA Marine Debris Division. <https://doi.org/10.25607/OBP-604>
- McKillup, S. (2011). *Statistics explained: An introductory guide for life scientists*. Cambridge University Press.
- Meijer, L. J. J., van Emmerik, T., van der Ent, R., Schmidt, C., & Lebreton, L. (2021). More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean. *Science Advances*, 7(18), eaaz5803. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz5803>
- Miller, M. E., Hamann, M., & Kroon, F. J. (2020). Bioaccumulation and biomagnification of microplastics in marine organisms: A review and meta-analysis of current data. *PLOS ONE*, 15(10), e0240792. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240792>
- Naidoo, T., & Glassom, D. (2019). Decreased growth and survival in small juvenile fish, after chronic exposure to environmentally relevant concentrations of microplastic. *Marine Pollution Bulletin*, 145, 254-259. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.02.037>
- Newton, R. J., McLellan, S. L., Dila, D. K., Vineis, J. H., Morrison, H. G., Eren, A. M., & Sogin, M. L. (2015). Sewage Reflects the Microbiomes of Human Populations. *mBio*, 6(2), 10.1128/mbio.02574-14. <https://doi.org/10.1128/mbio.02574-14>
- OECD. (2015). *Frascati Manual 2015: Guidelines for Collecting and Reporting Data on Research and Experimental Development* (Revised ed.). OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264239012-en>
- Oliva-Hernández, B. E., Santos-Ruiz, F. M., Muñoz-Wug, M. A., & Pérez-Sabino, J. F. (2021). Microplastics in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) from Lake Amatitlán. *Revista Ambiente & Agua*, 16, e2754. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2754>
- Olmos Espinar, S. (2021). Presencia y evolución de microplásticos en estaciones depuradoras de aguas residuales de la Región de Murcia: Propuesta de las mejores tecnologías disponibles para una emisión cero. <http://hdl.handle.net/10317/9359>
- Parolini, M., Stucchi, M., Ambrosini, R., & Romano, A. (2023). A global perspective on microplastic bioaccumulation in marine organisms. *Ecological Indicators*, 149, 110179. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110179>

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

- Peltzer, M. A., y Simoneau, C. (2013). Report of an interlaboratory comparison from the European Reference Laboratory for Food Contact Materials. Publications Office of the European Union: Luxembourg.
- Primpke, S., Dias, P. A., & Gerdt, G. (2019). Automated identification and quantification of microfibrils and microplastics. *Analytical Methods*, 11(16), 2138-2147. <https://doi.org/10.1039/C9AY00126C>
- Sanghamitra, P., Mazumder, D., & Mukherjee, S. (2021). Treatment of wastewater containing oil and grease by biological method- a review. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 56(4), 394-412. <https://doi.org/10.1080/10934529.2021.1884468>
- Sajjad, M., Huang, Q., Khan, S., Khan, M. A., Liu, Y., Wang, J., Lian, F., Wang, Q., & Guo, G. (2022). Microplastics in the soil environment: A critical review. *Environmental Technology & Innovation*, 27, 102408. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102408>
- Sedlak, D. (2017). Three Lessons for the Microplastics Voyage. *Environmental Science & Technology*, 51(14), 7747-7748. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03340>
- Simon, M., van Alst, N., & Vollertsen, J. (2018). Quantification of microplastic mass and removal rates at wastewater treatment plants applying Focal Plane Array (FPA)-based Fourier Transform Infrared (FT-IR) imaging. *Water research*, 142, 1-9.
- Smith, S. M., Lee, M. H., & Park, J. Y. (2022). Statistical analysis of microplastic removal in treatment facilities: A paired data approach. *Journal of Environmental Management*, 300, 113512. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113512>
- Song, J., Wang, C., & Li, G. (2024). Defining Primary and Secondary Microplastics: A Connotation Analysis. *ACS ES&T Water*, 4(6), 2330-2332. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.4c00316>
- Sonune, A., & Ghate, R. (2004). Developments in wastewater treatment methods. *Desalination*, 167, 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.113>
- Stapleton, M. J., & Hai, F. I. (2023). Microplastics as an emerging contaminant of concern to our environment: A brief overview of the sources and implications. *Bioengineered*, 14(1), 2244754.
- Stollberg, N., Kröger, S. D., Reininghaus, M., Forberger, J., Witt, G., & Brenner, M. (2021). Uptake and absorption of fluoranthene from spiked microplastics into the digestive gland tissues of blue mussels, *Mytilus edulis* L. *Chemosphere*, 279, 130480. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130480>
- Sun, J., Zheng, H., Xiang, H., Fan, J., & Jiang, H. (2022). The surface degradation and release of microplastics from plastic films studied by UV radiation and mechanical abrasion. *Science of The Total Environment*, 838, 156369. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156369>

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

- Tang, K. H. D., & Hadibarata, T. (2021). Microplastics removal through water treatment plants: Its feasibility, efficiency, future prospects and enhancement by proper waste management. *Environmental Challenges*, 5, 100264. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100264>
- Thompson, R. C., Swan, S. H., Moore, C. J., & vom Saal, F. S. (2009). Our plastic age. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1973-1976. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0054>
- Tomás-Sábado, J. (2010). Fundamentos de bioestadística y análisis de datos para enfermería (Vol. 2). Univ. Autònoma de Barcelona.
- Tran, N. H., Ngo, H. H., Urase, T., & Gin, K. Y.-H. (2015). A critical review on characterization strategies of organic matter for wastewater and water treatment processes. *Bioresource Technology*, 193, 523-533. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.091>
- Turner, A., & Holmes, L. A. (2015). Adsorption of trace metals by microplastic pellets in fresh water. *Environmental Chemistry*, 12(5), 600-610. <https://doi.org/10.1071/EN14143>
- van Tuylen, S. (2020). Estado de los cuerpos de agua de la cuenca del lago de Amatitlán. Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán.
- van Wezel, A., Caris, I., & Kools, S. A. E. (2016). Release of primary microplastics from consumer products to wastewater in the Netherlands. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 35(7), 1627-1631. <https://doi.org/10.1002/etc.3316>
- Varg, J. E., Outomuro, D., Kunc, W., Kuehrer, L., Svanbäck, R., & Johansson, F. (2022). Microplastic exposure across trophic levels: Effects on the host-microbiota of freshwater organisms. *Environmental Microbiome*, 17(1), 36. <https://doi.org/10.1186/s40793-022-00429-x>
- Vercauteren, M., Semmouri, I., Van Acker, E., Pequeur, E., Janssen, C., & Asselman, J. (2022). The Role Of Waste Water Treatment Plants on Environmental Microplastics Pollution (SSRN Scholarly Paper No. 4111949). Social Science Research Network. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4111949>
- Wang, F., Wang, B., Duan, L., Zhang, Y., Zhou, Y., Sui, Q., Xu, D., Qu, H., & Yu, G. (2020). Occurrence and distribution of microplastics in domestic, industrial, agricultural and aquacultural wastewater sources: A case study in Changzhou, China. *Water Research*, 182, 115956. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115956>
- Wang, L.-C., Lin, J. C.-T., Dong, C.-D., Chen, C.-W., & Liu, T.-K. (2021). The sorption of persistent organic pollutants in microplastics from the coastal environment. *Journal of Hazardous Materials*, 420, 126658. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126658>

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

- Wang, T., Li, B., Zou, X., Wang, Y., Li, Y., Xu, Y., Mao, L., Zhang, C., & Yu, W. (2019). Emission of primary microplastics in mainland China: Invisible but not negligible. *Water Research*, 162, 214-224. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.06.042>
- Xu, J.-L., Thomas, K. V., Luo, Z., & Gowen, A. A. (2019). FTIR and Raman imaging for microplastics analysis: State of the art, challenges and prospects. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 119, 115629. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.115629>
- Zhao, M., Huang, L., Arulmani, S. R. B., Yan, J., Wu, L., Wu, T., Zhang, H., & Xiao, T. (2022). Adsorption of Different Pollutants by Using Microplastic with Different Influencing Factors and Mechanisms in Wastewater: A Review. *Nanomaterials*, 12(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/nano12132256>
- Ziajahromi, S., Neale, P. A., Rintoul, L., & Leusch, F. D. L. (2017). Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: Development of a new approach to sample wastewater-based microplastics. *Water Research*, 112, 93-99. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.01.042>
- Ziajahromi, S., Neale, P. A., Telles Silveira, I., Chua, A., & Leusch, F. D. L. (2021). An audit of microplastic abundance throughout three Australian wastewater treatment plants. *Chemosphere*, 263, 128294. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128294>

14 Apéndice

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

14.1 Muestreo en PTARs



a)



b)

Ilustración I Recolección de muestras de agua residual, en el efluente de las plantas estudiadas, con el apoyo de la municipalidad de Villa Nueva.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024



Ilustración II Filtración de MPS en uno de los 4 puntos de extracción, de una de las 4 plantas estudiadas.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

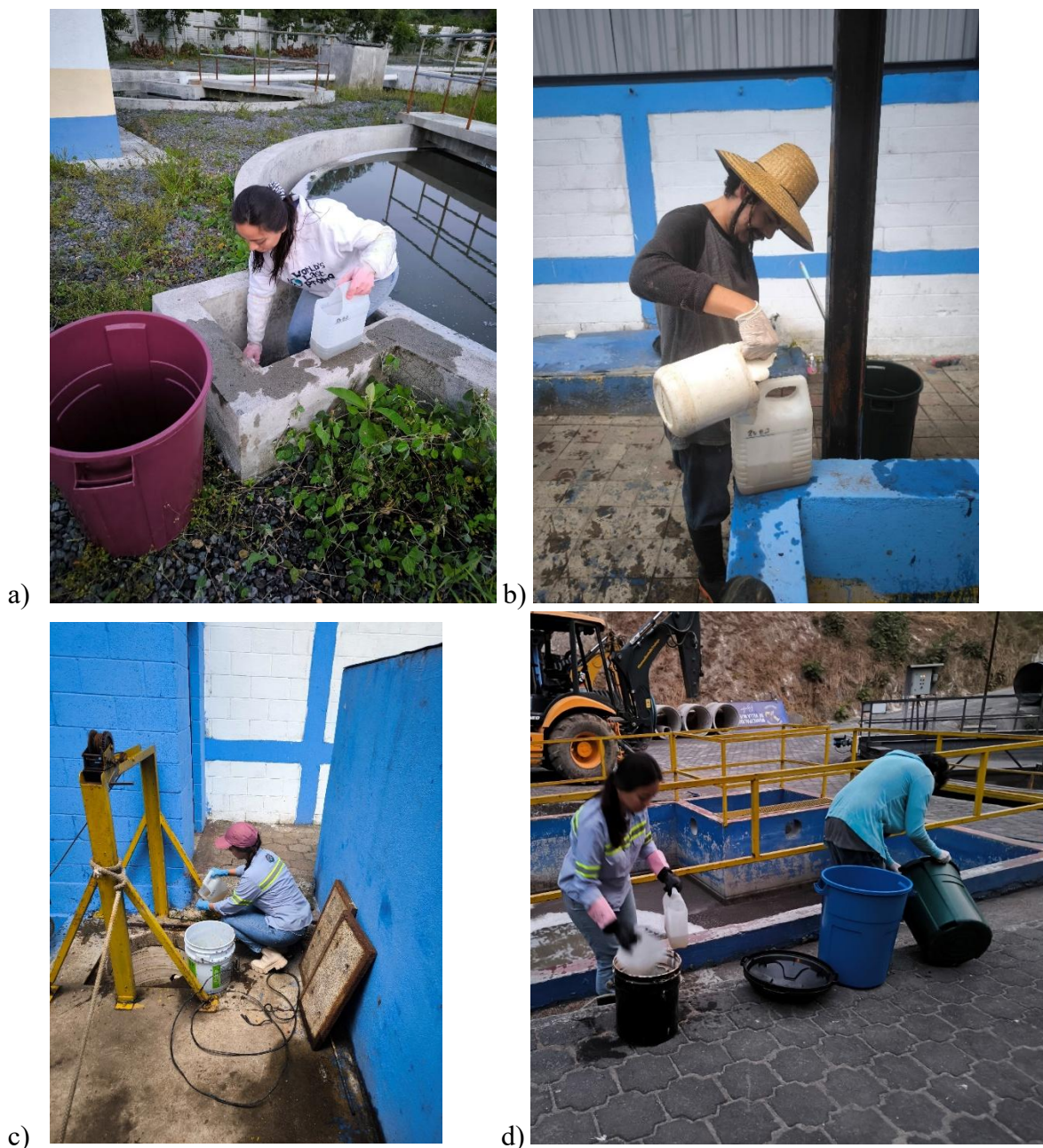


Ilustración III Extracción de MPS en uno de los 4 puntos de extracción, de las 4 plantas estudiadas.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024



Ilustración IV Extracción de MPS en uno de los 4 puntos de extracción, de una de las 4 plantas estudiadas, con el apoyo de trabajadores de la Municipalidad de Villa Nueva

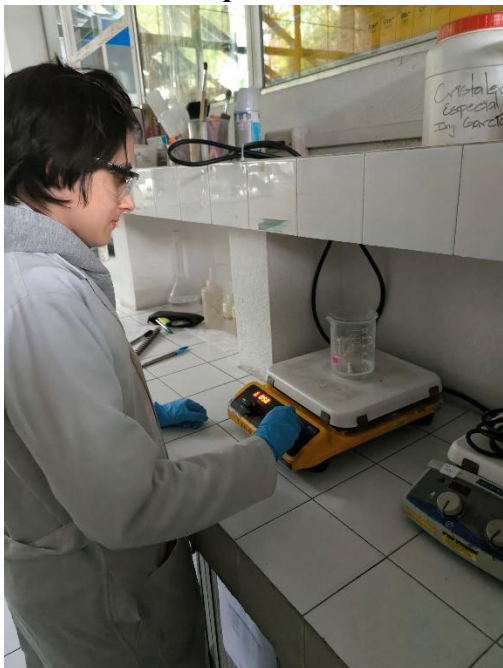
Informe final de Proyecto de Investigación 2024



Ilustración V Equipo para muestreo en PTAR.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

14.2 Tratamiento químico en laboratorio



a)

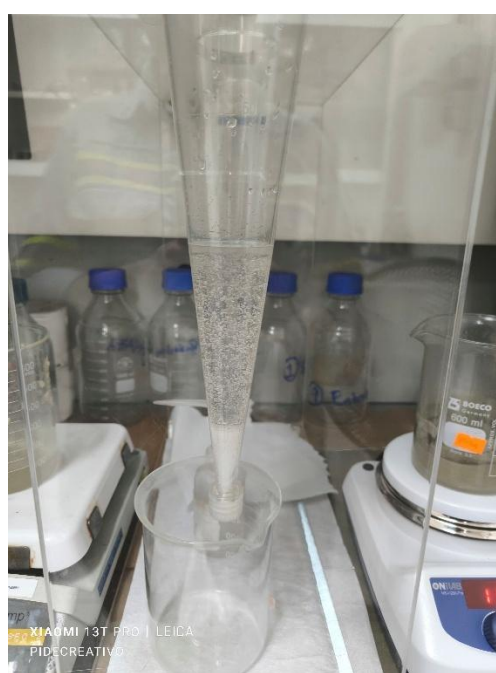


b)

Ilustración VI Tratamiento químico de oxidación de MPS obtenidas en PTAR.



a)



b)

Ilustración VII Separación por densidad de MPS obtenidas en PTAR.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024



a)



b)

Ilustración VIII Tratamiento físico de filtración de MPS por micro membranas, obtenidas en PTAR.

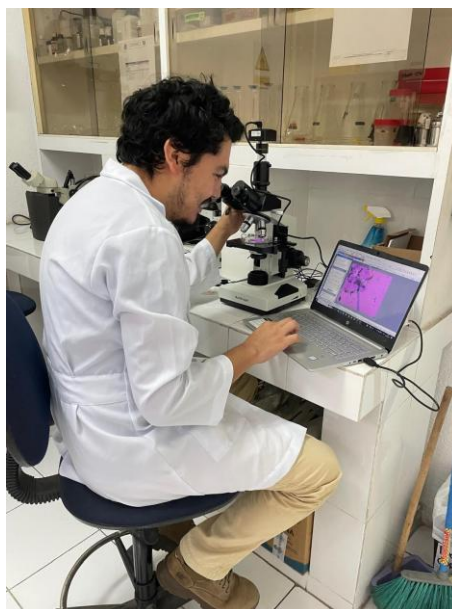


Ilustración IX Fotografía de MPS obtenidas en PTAR.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

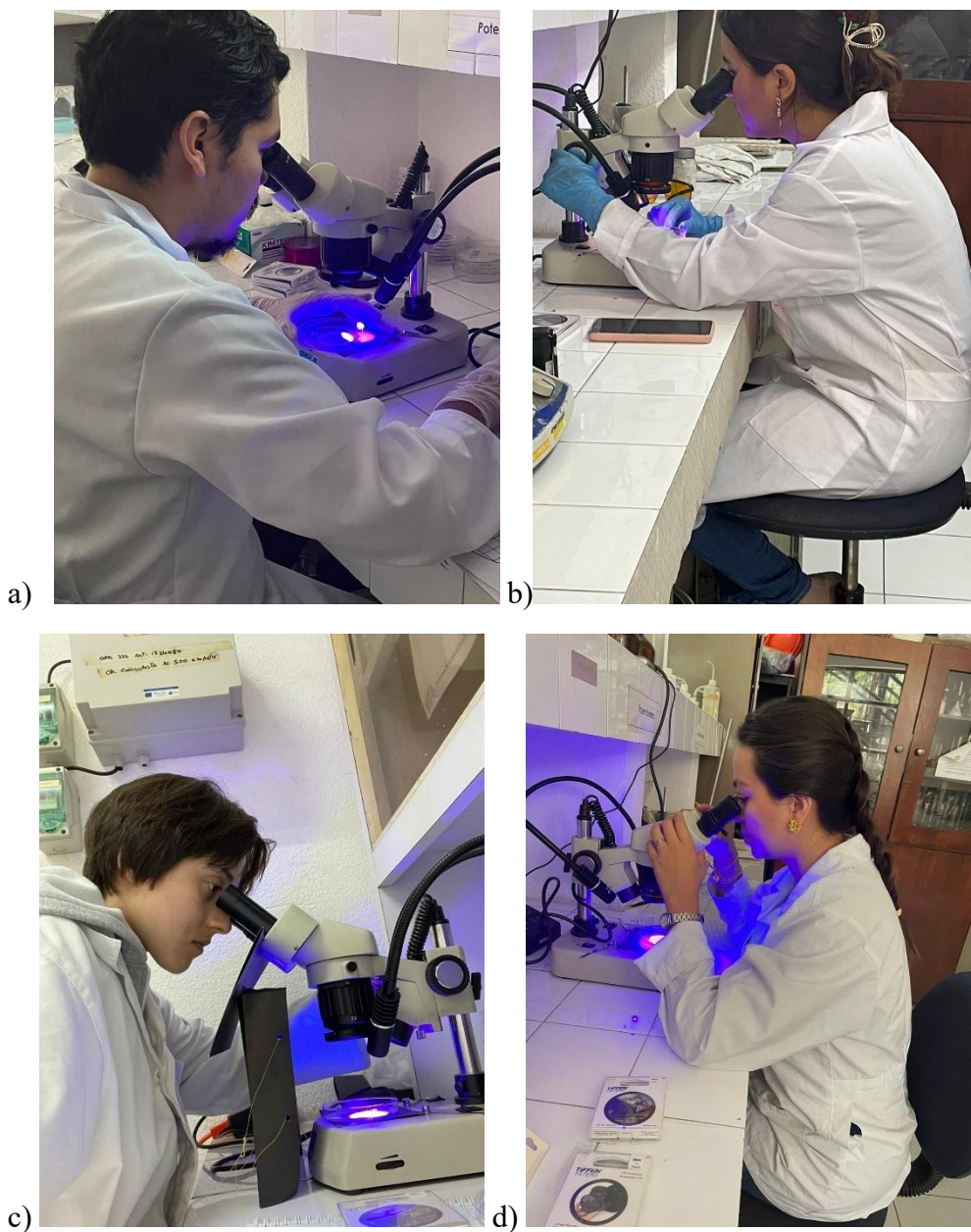


Ilustración X Conteo de MPS por medio de microscopía.

14.3 Microplásticos extraídos de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales

14.4 Presentación de resultados

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

NOTA: La difusión y divulgación, por cualquier medio, de los resultados de la investigación tiene que incluir los créditos a la Digi y unidad avaladora. En la publicación de un libro debe anotarse en la contraportada lo siguiente: “Este libro es producto del proyecto de investigación: Nombre del proyecto, avalado, aprobado y cofinanciado por el Fondo de Investigación de la Dirección General de Investigación, el nombre de la unidad avaladora de la Universidad de San Carlos de Guatemala, fecha, número de partida presupuestaria del proyecto de investigación”.

En las publicaciones en medios escritos y revistas científicas debe anotarse lo siguiente: “Esta investigación: Nombre del proyecto, fue cofinanciado por el Fondo de Investigación de la Dirección General de Investigación (Digi) de la Universidad de San Carlos de Guatemala, 2024, número de partida presupuestaria del proyecto de investigación”. Para los proyectos de investigación que gestionen el registro de un invento o patente, la Digi emite las disposiciones que deben aplicarse de conformidad con las leyes y/o políticas de propiedad intelectual que correspondan.

Declaración del coordinador (a) del proyecto de investigación

El coordinador (a) de proyecto de investigación con base en el Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación financiados por medio del Fondo de Investigación, artículos 13 y 20, dejo constancia que el personal contratado para el proyecto de investigación que coordino ha cumplido a satisfacción con la entrega de informes individuales por lo que es procedente hacer efectivo el pago correspondiente.

Paula María Vásquez Cifuentes Coordinador del proyecto de investigación	Firma
Fecha: 17/02/2025	

Aval del director (a) del instituto, centro, unidad o departamento de investigación o coordinador de investigación del centro regional universitario

De conformidad con el artículo 13 y 19 del Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación financiados por medio del Fondo de Investigación otorgo el aval al presente informe final de las actividades realizadas en el proyecto (escriba el nombre del proyecto de investigación) en mi calidad de (indique: director del instituto, centro, unidad o departamento de investigación o coordinador de investigación del centro universitario), mismo que ha sido revisado y cumple su ejecución de acuerdo a lo planificado.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Vo.Bo. Inga. Telma Maricela Cano Morales Directora, Centro de Investigaciones de Ingeniería	
Fecha: 28/02/2025	

Aprobación de la Dirección General de Investigación

Vo.Bo. Mtra. Sucelly Orozco de Morales Coordinadora del Programa Universitario de Investigación	
Fecha: 28/02/2025	
Cordinador General de Programas de Investigación Digi	
Fecha: 28/02/2025	

/Digi2024