

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA

ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN DE
MICROPLÁSTICOS EN LA COLUMNA
DE AGUA DEL ARROYO MORENO,
VERACRUZ EN TRES TEMPORADAS
CLIMÁTICAS.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGA

PRESENTA:



POZOS SILVA INGRID DANAÉ



DIRECTOR: DR. ÁNGEL MORÁN SILVA



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, quienes han estado siempre para mí. Gracias por todas las enseñanzas, por los consejos, por los regaños, por animarme cuando los días fueron complicados, por los esfuerzos que han hecho para darme todo lo que necesito. Han sido una pieza fundamental en mi desarrollo. Este logro no solo es mío, es también de ustedes.

A mis hermanos Víctor y Oswaldo por el apoyo, por las risas, por el cariño y por ser mi mayor motivación. Espero ser un ejemplo a seguir para ustedes, recuerden que son capaces de lograr todo lo que se propongan.

A mis abuelitos, a mis tíos Karla y Manuel, quienes me han visto crecer y me han acompañado en cada paso de mi vida. Gracias por su apoyo, por todo su cariño y por su constante interés en mi bienestar y por ser una fuente de inspiración.

A Samuel, por todo el apoyo, el cariño, las innumerables risas y por todas las enseñanzas. Por todo lo que hemos compartido y por terminar conmigo lo que comenzamos juntos hace 4 años. Gracias por ser parte de este sueño.

A mi tutor de tesis, el Dr. Ángel Morán Silva, por su guía, dedicación, paciencia y consejos a lo largo de todo el proyecto. De igual manera agradezco a mis asesores el Dr. Rafael Chávez López, el Dr. Sergio Cházaro Olvera, el Dr. Horacio Vázquez López y al Maestro Edgar Peláez Rodríguez por su apoyo, sus aportes a mi formación académica y por ser parte de este logro.

ÍNDICE

1.0 RESUMEN	6
2.0 INTRODUCCIÓN	7
3.0 ANTECEDENTES	10
4.0 OBJETIVOS	11
5.0 MATERIALES Y MÉTODOS	12
6.0 RESULTADOS.....	15
7.0 DISCUSIÓN	25
8.0 CONCLUSIONES	30
9.0 LITERATURA CITADA	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la zona de muestreo y estaciones en Arroyo Moreno, Veracruz....	13
Figura 2. Resultados de parámetros (pH, salinidad, oxígeno disuelto y temperatura) hidrológicos de cada mes de muestreo.....	15
Figura 3. Proporción (%) de tipos de microplásticos encontrados.	17
Figura 4. Proporción (%) de colores de microplásticos registrados	19
Figura 5. Proporción (%) de tallas de microplásticos encontradas.....	20
Figura 6. Imágenes de microplásticos encontrados en las muestras obtenidas con ayuda de un microscopio estereoscópico: fibras (d, g), fragmentos (e, i), películas (b, c, h) y microesferas (a, f).....	21
Figura 7. Análisis de componentes principales entre parámetros hidrológicos y tipos de microplásticos (PC1 y PC2).....	25
Figura 8. Análisis de componentes principales entre parámetros hidrológicos y tipos de microplásticos (PC3 y PC4).....	25

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Número total de tipo de microplásticos encontrados por estación y temporada climática, se muestra el valor promedio (Prom.) y desviación estándar (D.E.).....	16
Tabla 2. Número total de colores de microplásticos encontrados por estación y temporada climática.....	17
Tabla 3. Número total de tallas de microplásticos encontrados por estación y temporada climática.....	19
Tabla 4. Resultados obtenidos en la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk.	22
Tabla 5. Resultados obtenidos para la prueba de Kruskal-Wallis por estaciones, colores tipo y tallas de microplásticos.	23
Tabla 6. Resultados obtenidos de la prueba de Kruskal-Wallis por meses.	24

1.0 RESUMEN

Los estuarios son ecosistemas de gran importancia ecológica que proporcionan bienes y servicios ambientales, pero están cada vez más afectados por actividades humanas, lo que incluye la contaminación por microplásticos. Estos contaminantes llegan a los estuarios a través de descargas urbanas, escorrentía terrestre y la resuspensión de sedimentos, acumulándose en el ambiente acuático. Los microplásticos se clasifican por color y por su tamaño, morfología: fibras, fragmentos, esferas, espumas o pellets. El estuario periurbano del Arroyo Moreno, ubicado en la zona conurbada de Veracruz-Boca del Río-Medellín, es un área natural protegida que recibe una alta carga de contaminantes debido a la urbanización y actividades industriales cercanas. El presente estudio tuvo como objetivo identificar la presencia y distribución de microplásticos en la columna de agua del arroyo en tres temporadas climáticas (secas, lluvias y nortes) a lo largo de un año. Se realizaron muestreos en diferentes puntos utilizando una red de zooplancton de 300 micras, con arrastres de cinco minutos a una velocidad de 1 nudo. Las partículas recolectadas fueron analizadas bajo un microscopio estereoscópico y clasificadas según su tipo, color y tamaño. Los resultados indicaron la presencia de microplásticos en todas las muestras analizadas. Se encontró que la morfología predominante fue la de fibras (69.89%), seguida de fragmentos (29.24%). En cuanto a los colores, el más frecuente fue el azul (36%), seguido del transparente (24%) y el tamaño predominante fue de <1 mm (32%) seguido por los de 1 mm (27%). La temporada de lluvias presentó la mayor concentración de microplásticos (2,523 piezas plásticas) lo que sugiere que las precipitaciones desempeñan un papel crucial en el arrastre de microplásticos hacia el estuario, al aumentar el flujo de agua y permitir el transporte de estos contaminantes a lo largo de la cuenca. Además, se identificó una relación entre los microplásticos y factores como la temperatura, salinidad y pH, lo que sugiere que la distribución de microplásticos está influenciada por las condiciones hidrológicas del arroyo. Los resultados obtenidos indican que los estuarios son fuentes de microplásticos para los ecosistemas marinos y da una aproximación al grado de contaminación por microplásticos en el Arroyo Moreno.

Palabras clave: Microplásticos, Arroyo Moreno, Estuario, Columna de agua

2.0 INTRODUCCIÓN

Los estuarios son ecosistemas costeros en los que las aguas dulces continentales se mezclan con las aguas oceánicas, generando amplios gradientes de temperatura, salinidad y densidad. Esta confluencia de aguas crea entornos altamente dinámicos y productivos, caracterizados por una alta biodiversidad y una completa interacción de variables químicas, físicas y biológicas (Basáñez-Muñoz, 2018).

Debido a su gran biodiversidad, los estuarios desempeñan un papel fundamental en el ecosistema, ya que funcionan como zonas de alimentación y crianza para numerosas especies de fauna (EPA, 2024). Además, son esenciales para la sostenibilidad de las pesquerías locales y la producción de materias primas. Asimismo, su función como hábitats de transición los convierte en puntos clave para evaluar la interacción entre ambientes terrestres y marinos. Su presencia también contribuye a la protección de las comunidades costeras, actuando como barreras naturales que mitigan el impacto de inundaciones y fenómenos climáticos extremos en áreas de actividad humana (Chávez-López, 2022).

Estos ecosistemas están cada vez más amenazados por la contaminación derivada de actividades humanas, incluyendo la acumulación de residuos plásticos, los microplásticos han emergido como un problema ambiental crítico debido a su ubicuidad y persistencia en el medio acuático (Arthur et al., 2009). Debido a su ubicación geográfica, los estuarios actúan como receptores naturales de escorrentías provenientes de diversas fuentes terrestres. Estas escorrentías, que incluyen aguas pluviales y flujos superficiales, transportan sedimentos, nutrientes y contaminantes desde las cuencas hidrográficas hacia los estuarios. En consecuencia, los procesos naturales de los estuarios pueden verse alterados afectando su equilibrio ecológico, este proceso puede convertir a los estuarios en zonas de acumulación de desechos y contaminantes, afectando negativamente su salud ecológica (EPA, 2024).

Los plásticos son materiales sintéticos de origen orgánico, tienen la característica de que pueden ser modificados o moldeados mediante la temperatura. Por lo general los plásticos son polímeros que han sido sometidos a procesos industriales (Pereiras-Varela, 2019). Los primeros plásticos fueron sintetizados en los años 1950s, reemplazando rápidamente otros materiales, como el vidrio y la madera, esto debido a sus propiedades que le confieren una gran durabilidad (Martínez-González y Guerrero-Rivera, 2020).

El uso masivo de plásticos ha llevado a una creciente acumulación de residuos en diversos ecosistemas, incluidos los cuerpos de agua. Se pueden distinguir tres tipos principales de plásticos según su composición: termoplásticos, termoestables y elastómeros. Los termoplásticos se funden al estar en contacto con el calor y, al enfriarse, mantienen la forma: polietileno (PE), polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC), poliestireno (PS), poliéster, acrílico y nylon. Los termoplásticos suponen casi el 50% de los plásticos fabricados. Los termoestables, una vez que se enfrían, no pueden volver a ser moldeados; al aplicarles calor, estos se degradan: resinas fenólicas, resinas de poliéster, poliuretano, siliconas y caucho sintético (Pereiras-Varela, 2019). Los elastómeros son parte de los termoestables, lo que los hace elásticos, permitiendo que el material se estire y vuelva a su forma original (caucho, neopreno, nitrilo, silicona, poliuretano y vitón) (López del Valle, 2023). Los tipos más comunes de plásticos incluyen el tereftalato de polietileno (PET), el polietileno (PE), el polipropileno

(PP), el poliestireno (PS), el cloruro de polivinilo (PVC) y el nylon, siendo estos los plásticos más encontrados en el mar (Cantos-Iñiguez, 2019).

Los plásticos también se agrupan según su tamaño: macrolásticos (>25 mm), mesoplásticos (entre 25 y 5 mm), microplásticos (5 mm a 1µm) y nanoplásticos (<1 µm) (Pereiras Varela, 2019). Los microplásticos se definen como partículas de tamaño igual o menor a 5 milímetros y mayor o igual a un micrómetro (Álvarez-Zeferino, 2020). Se pueden distinguir dos tipos de microplásticos: primarios y secundarios. Los microplásticos primarios son aquellos fabricados a nivel industrial en tamaños milimétricos, agregados a productos de cuidado personal o empleados como materia prima en la fabricación de productos industriales, denominados pellets (Cruz-Salas, 2020). Los microplásticos secundarios resultan de la fragmentación de plásticos de mayor tamaño, debido a la fotodegradación, oxidación y abrasión por la acción de las olas (Zhang, 2016). Dentro de este tipo se encuentran fibras textiles y fragmentos de diversos plásticos (Andrady, 2017). Además, estos se pueden clasificar según sus características morfológicas: tamaño, color y forma, tales como fibras, pellets, fragmentos y películas (Viršek et al., 2016).

La mayoría de los residuos que llegan al mar terminan acumulándose en los sedimentos marinos (70%), mientras que el resto permanece en las orillas (15%) y en la columna de agua (15%) (Cantos-Iñiguez, 2019). Esta distribución varía en función de factores como la hidrodinámica del sistema, la densidad de los polímeros y la interacción con la materia orgánica y los organismos que ahí habitan (Galloway et al., 2017). Las fuentes de microplásticos en los cuerpos de agua incluyen las aguas residuales, las descargas de zonas urbanas, los rellenos sanitarios, las áreas industriales, las descargas accidentales, el viento y las corrientes marinas, que son capaces de mover los microplásticos, afectando su distribución (Sarria-Villa y Gallo-Corredor, 2016).

Los estuarios actúan como depósitos temporales de microplásticos durante la temporada de sequía. En contraste, durante el período de lluvias, el agua de los ríos transportan estos materiales hacia el mar, y durante los nortes, los sedimentos tienden a levantarse, liberando todos los elementos que se encuentran entre ellos (López-Monroy, 2019).

Algunos de estos materiales tienden a hundirse, mientras que otros flotan debido a las diferencias de densidad. Como resultado, se pueden encontrar microplásticos en toda la columna de agua (López-Monroy, 2019).

El Golfo de México es una región de gran relevancia para nuestro país debido a su diversidad de ecosistemas, que incluyen costas, mares, ríos, humedales y lagunas. En sus litorales habita más del 35% de la población mexicana, lo que resalta su importancia en ámbitos sociales, económicos y productivos, abarcando actividades como la agricultura, la pesca, la industria petrolera, la generación de energía, la minería y el comercio. Además, esta región es de gran importancia para la biodiversidad marina, con una variedad de especies endémicas que dependen de estos ecosistemas para su supervivencia. Como resultado de todas estas actividades, se han introducido grandes volúmenes de descargas con diversos contaminantes, entre ellos los microplásticos (Vázquez-Botello, 2019). El aumento de estos contaminantes ha afectado particularmente a los ecosistemas costeros y marinos, alterando tanto la calidad del agua como la salud de la fauna marina, lo que pone en peligro la seguridad alimentaria de poblaciones locales que dependen de la pesca (Sánchez et al., 2021).

México enfrenta una creciente problemática relacionada con la producción y desecho de plásticos. El país genera aproximadamente 44.6 millones de toneladas de residuos urbanos al año, de los cuales 7 millones corresponden a desechos plásticos. Esto equivale a un consumo per cápita de 66 kg de plásticos por habitante al año, con una generación de residuos plásticos de 59 kg por persona. Un aspecto preocupante es el manejo inadecuado de estos residuos, ya que se estima que entre el 38% y el 58% de los desechos plásticos no se gestionan correctamente, lo que aumenta su potencial de fuga hacia el medio ambiente. Además, menos del 10% de los residuos plásticos se reciclan en el país, lo que contribuye a la acumulación de plásticos en diversos ecosistemas (SEMARNAT, 2023).

Veracruz, con su extensa línea costera y rica biodiversidad, ha sido particularmente afectado por la contaminación plástica. Estudios recientes han documentado la presencia significativa de microplásticos en diversas playas de la región (Peralta-Peláez, 2023). Esto presenta un riesgo significativo para la biodiversidad local y la salud humana, ya que estos fragmentos pueden ser ingeridos por organismos marinos y entrar a la cadena alimentaria y así afectarnos a nosotros (Peralta-Peláez, 2023).

El Arroyo Moreno, ubicado entre los municipios de Medellín de Bravo y Boca del Río Veracruz, es un pequeño río que desemboca en un cauce mayor, el río Jamapa, el cual desemboca en el mar en el municipio de Boca del Río. El arroyo es de tipo ribereño, lo que significa que tiene condiciones estuarinas (Aké-Castillo et. al., 2016). A pesar de ser considerado un área natural protegida, el arroyo está rodeado por zonas urbanas y ha experimentado un deterioro ambiental significativo. Se ha reportado que se vierten descargas domésticas, industriales y escurrimientos provenientes de la ciudad, lo que representa fuentes puntuales de contaminación (Castañeda-Chávez y Lango-Reynoso, 2021).

El problema de los microplásticos ha alcanzado una magnitud global, afectando incluso áreas naturales protegidas tanto en ambientes marinos como de agua dulce, lo que plantea serios desafíos para la salud de los ecosistemas acuáticos (de Sá et al., 2018). Esta contaminación no solo impacta la biodiversidad, sino que también puede tener efectos perjudiciales en las especies que habitan estos ecosistemas, alterando sus procesos ecológicos fundamentales. Los microplásticos, debido a su persistencia y ubicuidad, tienen la capacidad de acumularse a lo largo del tiempo, lo que incrementa la exposición de los organismos a sustancias químicas tóxicas adheridas a estas partículas. Este fenómeno puede desencadenar efectos bioacumulativos, afectando la salud de especies marinas y, por ende, las cadenas tróficas (Álvarez-Zeferino, 2020).

Además, los microplásticos no permanecen estáticos en el agua, sino que se distribuyen verticalmente a lo largo de la columna de agua, un proceso influenciado por la turbulencia provocada por el viento, esta distribución vertical implica que los microplásticos no solo afectan las capas superficiales, sino también las zonas más profundas, lo que aumenta su potencial de impacto a largo plazo (Álvarez-Zeferino, 2020). Por ello es importante conocer la variación de los microplásticos a lo largo de las temporadas climáticas y contribuir a la conservación de este ecosistema.

3.0 ANTECEDENTES

Rosado-Piña (2018) demostró que la presencia de residuos plásticos en playas está estrechamente relacionada con la cantidad de microplásticos encontrados, destacando el polietileno como el material más común. Este hallazgo se relaciona con la alta correlación entre residuos sólidos y microplásticos encontrada por Cruz-Salas (2020), lo que sugiere que la fragmentación de desechos plásticos es una fuente importante de contaminación.

García-Jaramillo et. al. (2023) evidenció la presencia de microplásticos en peces comerciales de Alvarado, Veracruz, con un 18% de organismos afectados, predominando fibras azules de aproximadamente 1.17 mm de longitud. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Ruiz-Serrano (2021) en la laguna de Catemaco, donde se identificaron microplásticos en el agua, sedimento y tracto digestivo de *Oreochromis aureus*, destacando la presencia de fibras y fragmentos en diferentes colores y formas.

En el medio marino, Cruz-Salas (2020) y Peralta-Peláez (2023) identificaron microplásticos en playas de diferentes regiones de México, destacando La Misión y el Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano como zonas de alta contaminación. En ambos casos, los fragmentos plásticos y fibras fueron las formas más comunes, con polietileno y poliestireno como polímeros predominantes. De manera similar, Álvarez-Zeferino (2020) registró concentraciones variables de microplásticos en once playas mexicanas, concluyendo que las corrientes marinas contribuyen significativamente a la acumulación de estos contaminantes.

Finalmente, estudios como el de Sánchez-Hernández (2018) en el estuario de Tecolutla y el de López del Valle (2023) en el Arroyo Moreno han analizado la distribución de microplásticos en la columna de agua a lo largo de las temporadas climáticas. Sánchez-Hernández (2018) encontró una diferencia significativa en la longitud y concentración de partículas entre estaciones, mientras que López del Valle (2023) determinó que la temporada de secas presentó la mayor cantidad de microplásticos, con fibras y fragmentos de 0.2 a 5 mm de longitud predominando en todas las muestras.

4.0 OBJETIVOS

Objetivos generales

- Determinar la variación en la concentración de microplásticos durante tres temporadas climáticas: Nortes, secas y lluvias en el estuario periurbano de Arroyo Moreno.

Objetivos particulares

- Registrar los parámetros hidrológicos de la zona de estudio.
- Evaluar la concentración y tipos de microplásticos presentes en la columna de agua.
- Analizar la concentración de microplásticos y su relación con las temporadas climáticas.

5.0 MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Área de estudio

El estudio se realizó a lo largo del Arroyo Moreno, el cual forma parte de la Reserva Natural Estatal del mismo nombre, ubicada entre los municipios de Medellín de Bravo y Boca del Río, en el estado de Veracruz. Se localiza en las coordenadas 19° 05' - 19° 08' N y 96° 06' - 96° 09' O (García Villar et al., 2019).

El clima de la región es cálido subhúmedo (Aw2), con una temperatura media anual de 22 °C y una mínima de 18 °C. La precipitación anual oscila entre 1,500 y 2,000 mm, con las lluvias más abundantes entre julio y septiembre. La zona está sujeta climáticamente a tres estaciones: nortes, lluvias y seca. La temporada de "nortes" ocurre de noviembre a marzo, mientras que la época de secas se extiende de abril a junio, la temporada de lluvias va de agosto a octubre (García Villar et al., 2019).

Desde hace años, el crecimiento urbano en las inmediaciones de la reserva ha provocado que ciertas áreas sean utilizadas como vertederos, además de recibir descargas de aguas residuales domésticas e industriales provenientes del canal de la Zamorana (García Villar et al., 2019). Asimismo, las actividades turísticas, pesqueras, ganaderas e industriales han contribuido a la contaminación del arroyo (CONABIO, 2014).

5.2 Muestreo

Se llevó a cabo un total de tres muestreos a lo largo de un año, estos muestreos están distribuidos a lo largo de las tres principales temporadas climáticas de la región: uno en el mes de mayo, correspondiente a la época de secas; otro en julio, que corresponde a la época de lluvias; y el último en noviembre, durante la temporada de nortes. Todos los muestreos se realizaron a lo largo del Arroyo Moreno, específicamente desde su desembocadura en el río Jamapa hasta su intersección con el canal de la Zamorana, abarcando un recorrido que incluye zonas de variabilidad climática y ecológica.

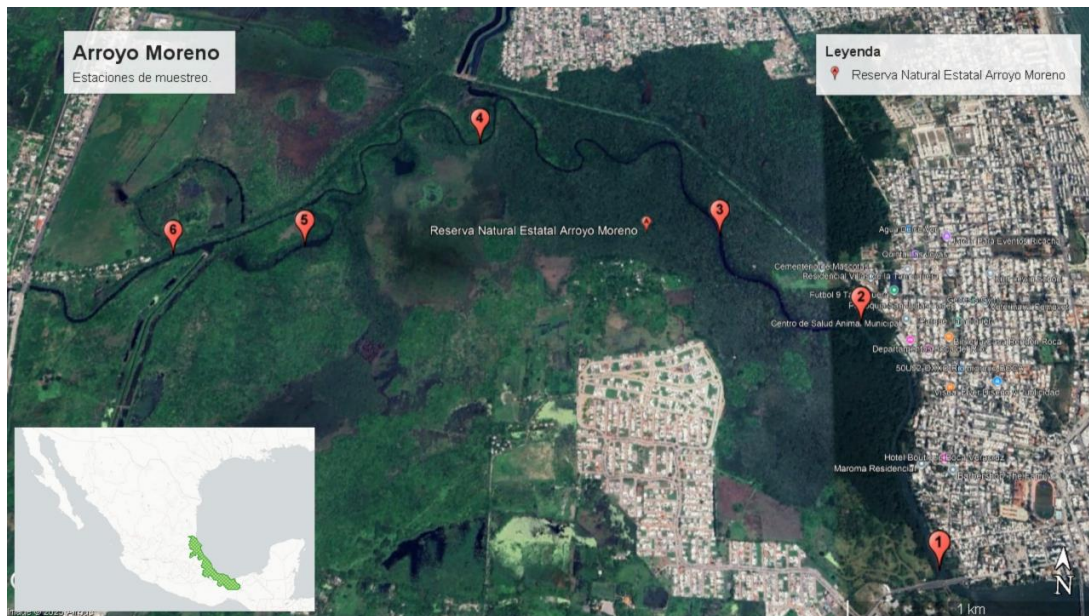


Figura 1. Localización de la zona de muestreo y estaciones en Arroyo Moreno, Veracruz.

Para garantizar una cobertura adecuada de las diferentes condiciones del entorno, se establecieron seis estaciones de muestreo a lo largo de este trayecto (Figura 1): 1: Boca del estuario, 2: Zona urbana, 3: Centro de la zona protegida, 4: Intersección con el canal de la Zamorana, 5 y 6: Antes y después de la salida de agua de la termoeléctrica CFE Dos Bocas (López del Valle, 2023).

En cada estación de muestreo se midieron los parámetros hidrológicos para la caracterización de las condiciones del agua. Estos parámetros incluyen temperatura ($^{\circ}\text{C}$), pH, salinidad (UPS) y oxígeno disuelto (ppm) los cuales serán registrados utilizando un multiparámetro marca Hanna, modelo 9108.

Para la obtención de microplásticos en la columna de agua, se utilizó una red cónica de malla de nylon mediante arrastres superficiales durante intervalos de 5 minutos a una velocidad constante de 1 nudo por hora. La red utilizada tiene una abertura de 350 micrómetros, un diámetro de 50 cm en la boca, 250 cm de largo y un copo de PVC, obteniendo una muestra de un litro por estación de muestreo.

Una vez obtenidas las muestras, estas fueron depositadas cuidadosamente en frascos de plástico previamente etiquetados para asegurar su correcta identificación. Además, se fijaron inmediatamente con alcohol para preservar las muestras durante su traslado al laboratorio.

5.3 Procedimiento de laboratorio

Para evitar la contaminación de las muestras, se utilizó bata de laboratorio de algodón y material de vidrio estéril. Además, se tuvo un cuidado especial en la manipulación y almacenamiento de las muestras usando guantes de nitrilo para evitar la introducción de contaminantes externos.

Las muestras fueron sometidas a un primer filtrado con una red de 97 micrómetros para eliminar partículas de mayor tamaño. Una vez filtradas, las muestras se almacenaron en

frascos de vidrio, los cuales fueron etiquetados con la información necesaria para su identificación: fecha de recolección, número de estación y área de muestreo.

Posteriormente se tomaron alícuotas de 10 ml de cada muestra, las cuales previamente fueron filtradas nuevamente en una malla metálica con un diámetro de 1.5 mm para volver a eliminar las partículas más grandes. A cada alícuota se le añadió 10 ml de agua oxigenada (H₂O₂) al 30 % (Guzhñay Lozano, 2024), esta solución se dejó reposar durante 24 horas con el fin de eliminar la materia orgánica presente en las muestras.

El análisis de las muestras se llevó a cabo mediante observación visual utilizando un microscopio estereoscópico. Los microplásticos se clasificaron manualmente según su tipo, que puede incluir fibras, fragmentos, pellets y películas, de acuerdo con el método descrito por Silva et al. (2018). Además, se registró el color de los microplásticos observados, ya que esta característica puede proporcionar información adicional sobre su origen y composición. Para medir la longitud de los microplásticos obtenidos se empleó papel milimétrico (Cruz-Salas, 2020), lo cual permitirá una medición más precisa. Las longitudes de los microplásticos se registraron para cada muestra individualmente. Este procedimiento se repitió en tres ocasiones para cada muestra, con el fin de asegurar la reproducibilidad de los resultados y obtener una media representativa de los valores observados.

5.4 Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de las muestras procesadas, se realizaron tres repeticiones por cada una de las muestras, lo que permitirá obtener un conjunto de datos más representativo para cada estación de muestreo y mejorar la fiabilidad de los resultados. Una vez obtenida la concentración de microplásticos para cada repetición, los datos fueron ingresados al programa PAST (Hammer, et. al., 2001) donde se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk (Guzhñay-Lozano, 2024) para determinar si los datos siguen una distribución normal. Dado que los datos no siguen una distribución normal, se aplicó una prueba de Kruskal-Wallis (Guzhñay-Lozano, 2024), que es adecuada para comparar más de dos grupos independientes y evaluar si existen diferencias significativas entre las concentraciones de microplásticos en las distintas estaciones de muestreo. Por último, se realizó un análisis de componentes principales (PCA) para analizar si existe una relación entre los parámetros hidrológicos y la presencia de microplásticos.

6.0 RESULTADOS

Se observaron cambios en los parámetros de los tres meses de muestreo confirmando las tres temporadas climáticas establecidas (lluvias, secas y nortes) (Figura 2). Durante la temporada de secas, la temperatura presentó los valores más elevados, alcanzando un máximo de 37.27 °C, mientras que en la temporada de nortes se registraron las temperaturas más bajas, con un mínimo de 24.96 °C. La época de lluvias mostró temperaturas intermedias, con valores entre 30.35 y 32.68 °C, manteniendo una menor variabilidad entre los puntos de muestreo.

El comportamiento del pH reflejó una ligera tendencia a la alcalinidad en la época seca, con valores que oscilaron entre 7.3 y 7.76, mientras que en las temporadas de lluvias y nortes el pH se mantuvo más estable y cercano a la neutralidad (7.02 - 7.09 en lluvias y 7.22 - 7.27 en nortes).

La salinidad mostró una variabilidad marcada entre las estaciones, con un incremento significativo durante la época seca, alcanzando valores entre 2.8 y 14.81 UPS. En contraste, durante la temporada de lluvias, la salinidad se redujo drásticamente a valores entre 0.21 y 0.39 UPS, reflejando un aumento en el caudal de escorrentía y la mayor precipitación. La temporada de nortes presentó un comportamiento intermedio, con valores de salinidad entre 2.29 y 5.69 UPS. El oxígeno disuelto mostró una tendencia inversa a la temperatura, con valores más elevados en la época seca (0.76 - 5.0 ppm) y lluvias (0.86 - 3.48 ppm), mientras que durante los nortes se registraron las concentraciones más bajas, con valores entre 0.12 y 0.41 ppm.



Figura 2. Resultados de parámetros (pH, salinidad, oxígeno disuelto y temperatura) hidrológicos de cada mes de muestreo.

En todas las muestras analizadas se identificó la presencia de microplásticos (Tabla 1) (Figura 6), se obtuvo un total de 4.066 piezas plásticas, en la temporada de lluvias se obtuvieron 2,523 piezas, en la temporada de secas se obtuvieron 1,083 piezas y en la temporada de nortes se obtuvieron 460 piezas. Predominaron las fibras, que representaron el 69% del total, seguidas por los fragmentos con un 29%, las películas con un 0.7% (Figura 3) y las microesferas, las cuales solo se detectaron en tres estaciones. Su presencia fue más notable durante el mes de julio (temporada de lluvias), especialmente en la zona urbana (E1) y en el área de descarga de agua de la termoeléctrica de Dos Bocas (E5).

Tabla 1. Número total de tipo de microplásticos encontrados por estación y temporada climática, se muestra el valor promedio (Prom.) y desviación estándar (D.E.).

	Estación	Tipos				Prom.	D.E.
		Fibras	Fragmentos	Microesferas	Películas		
	E1	613	210	0	0	205.75	288.98
	E2	357	23	3	0	95.75	174.46
Julio (Lluvias)	E3	120	30	0	2	38.0	56.35
	E4	212	84	0	4	75.0	99.19
	E5	355	167	2	10	133.5	166.06
	E6	261	56	0	2	79.75	123.58
	E1	76	153	0	4	58.25	72.17
	E2	21	55	0	0	19.0	25.96
Mayo (Secas)	E3	39	136	1	1	44.25	63.73
	E4	99	43	0	2	36.0	46.43
	E5	208	71	1	0	70.0	97.81
	E6	158	15	0	0	43.25	76.82
	E1	69	15	0	0	21.00	32.77
	E2	58	8	0	0	16.5	27.92
Noviembre (Nortes)	E3	61	44	0	0	26.25	31.09
	E4	51	48	0	2	25.25	28.04
	E5	59	20	0	2	20.25	27.35
	E6	17	7	0	0	6.00	8.04
Total	2834	1185	7	29	1013.75	1446.83	

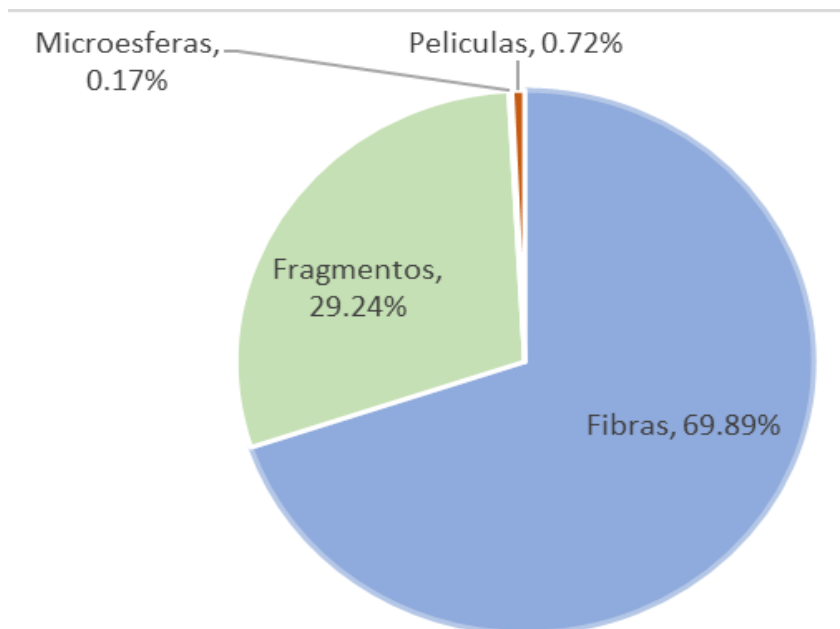


Figura 3. Proporción (%) de tipos de microplásticos encontrados.

Se identificaron 13 colores distintos de microplásticos (Tabla 2), siendo el más frecuente el azul, con un 36%, seguido del transparente con un 24% y el negro con un 9% (Figura 4). También se encontraron otros colores en menor proporción, como gris, blanco, rojo, verde, rosa, amarillo, naranja, café, morado y combinaciones de estos.

Tabla 2. Número total de colores de microplásticos encontrados por estación y temporada climática.

	Color	Estación						Prom.	D.E.
		E1	E2	E3	E4	E5	E6		
	Azul	448	124	50	86	127	102	156.17	145.73
	Morado	7	7	3	4	52	3	12.67	19.36
	Rojo	18	17	19	20	42	25	23.5	9.48
	Transparente	327	171	24	57	87	30	116	116.39
	Verde	2	2	5	17	38	11	12.5	13.78
	Rosa	7	5	7	15	23	13	11.67	6.77
Julio (lluvias)	Amarillo	7	5	1	9	19	5	7.67	6.15
	Café	9	5	3	11	18	10	9.33	5.24
	Naranja	1	2	0	9	16	11	6.5	6.47
	Blanco	2	5	14	23	42	27	18.83	14.96
	Negro	4	22	16	38	46	67	32.17	22.79
	Gris	2	11	7	4	18	13	9.17	5.98
	Combinado	0	6	2	7	6	2	3.83	2.86
	Azul	35	15	59	67	113	97	64.33	36.78
	Morado	3	1	1	1	4	4	2.33	1.51

	Rojo	4	0	3	4	12	3	4.33	4.03
	Transparente	89	26	42	25	57	29	44.67	24.92
	Verde	10	1	9	3	8	5	6.0	3.58
	Rosa	6	2	5	2	13	6	5.67	4.03
Mayo (Secas)	Amarillo	3	3	9	1	5	1	3.67	3.01
	Café	1	0	0	1	5	3	1.67	1.97
	Naranja	3	0	3	0	3	0	1.5	1.64
	Blanco	47	18	25	10	23	0	20.5	15.91
	Negro	21	8	9	15	30	16	16.5	8.17
	Gris	7	1	8	13	7	8	7.33	3.83
	Combinado	1	1	3	2	0	0	1.17	1.17
	Azul	47	22	30	26	18	12	25.83	12.11
	Morado	3	0	1	1	0	0	0.83	1.17
	Rojo	3	5	0	0	10	0	3.0	4.0
	Transparente	10	4	8	16	6	0	7.33	5.47
	Verde	1	1	5	3	0	0	1.67	1.97
	Rosa	0	3	4	7	0	0	2.33	2.88
Noviembre (Nortes)	Amarillo	0	0	0	3	0	0	0.5	1.22
	Café	0	1	0	4	0	0	0.83	1.6
	Naranja	0	0	1	1	2	0	0.67	0.82
	Blanco	0	4	31	19	17	1	12.0	12.36
	Negro	17	10	18	13	14	6	13.0	4.47
	Gris	2	16	7	1	13	4	7.17	6.11
	Combinado	1	0	0	2	1	0	0.67	0.82

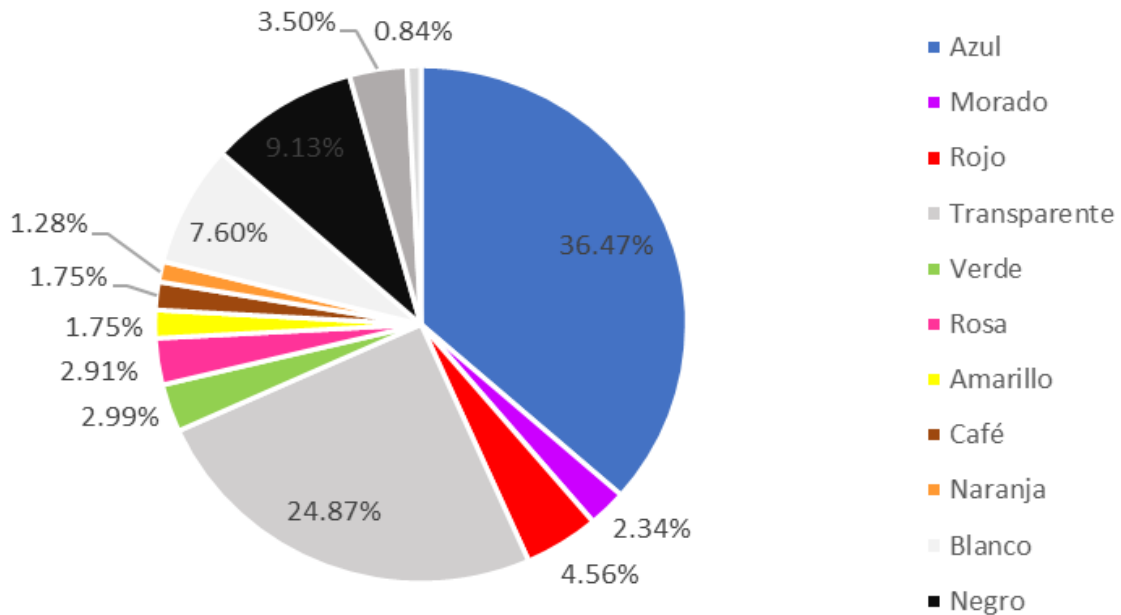


Figura 4. Proporción (%) de colores de microplásticos registrados.

Se identificaron microplásticos con tamaños que van desde menores a 1 mm (<1 mm) hasta 5mm (Tabla 3). Los de menor tamaño (<1 mm) fueron los más abundantes, representando el 32% del total, seguidos por los de 1 mm con un 27% y los de 2 mm con un 19% (Figura 5).

Tabla 3. Número total de tallas de microplásticos encontrados por estación y temporada climática.

	Tallas	Estaciones						Prom.	D.E.
		E1	E2	E3	E4	E5	E6		
	1.5mm	23	6	4	8	28	23	15.33	10.46
	1mm	180	143	50	97	173	122	127.50	49.06
	-1mm	396	68	41	72	109	40	121.00	137.07
	2.5mm	3	0	1	1	7	1	2.17	2.56
Julio (Lluvias)	2mm	135	102	32	67	117	69	87.00	37.89
	3.5mm	1	0	0	0	1	0	0.33	0.52
	3mm	61	42	14	26	67	35	40.83	20.33
	4mm	26	9	4	17	20	16	15.33	7.84
	5mm	12	12	5	9	12	13	10.50	3.02
	4.5mm	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
	1.5mm	10	4	7	5	18	24	11.33	7.99
	1mm	69	23	30	38	58	40	43.00	17.34
	-1mm	84	52	89	51	87	34	66.17	23.40
	2.5mm	2	1	2	1	3	3	2.00	0.89
Mayo (Secas)	2mm	45	14	25	23	54	41	33.67	15.31

	3.5mm	0	0	0	0	1	0	0.17	0.41
	3mm	14	4	12	16	40	12	16.33	12.29
	4mm	2	1	7	6	12	9	6.17	4.17
	5mm	5	4	5	4	7	0	4.17	2.32
	4.5mm	1	1	0	0	0	0	0.33	0.52
	1.5mm	11	3	9	7	4	1	5.83	3.82
	1mm	17	19	19	23	21	4	17.17	6.77
	<1mm	35	21	46	45	33	10	31.67	14.00
	2.5mm	2	0	1	0	4	3	1.67	1.63
Noviembre (Nortes)	2mm	15	13	15	16	10	4	12.17	4.54
	3.5mm	0	0	0	0	2	0	0.33	0.82
	3mm	3	6	11	7	5	1	5.50	3.45
	4mm	1	2	4	2	1	0	1.67	1.37
	5mm	0	2	0	1	1	0	0.67	0.82
	4.5mm	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00

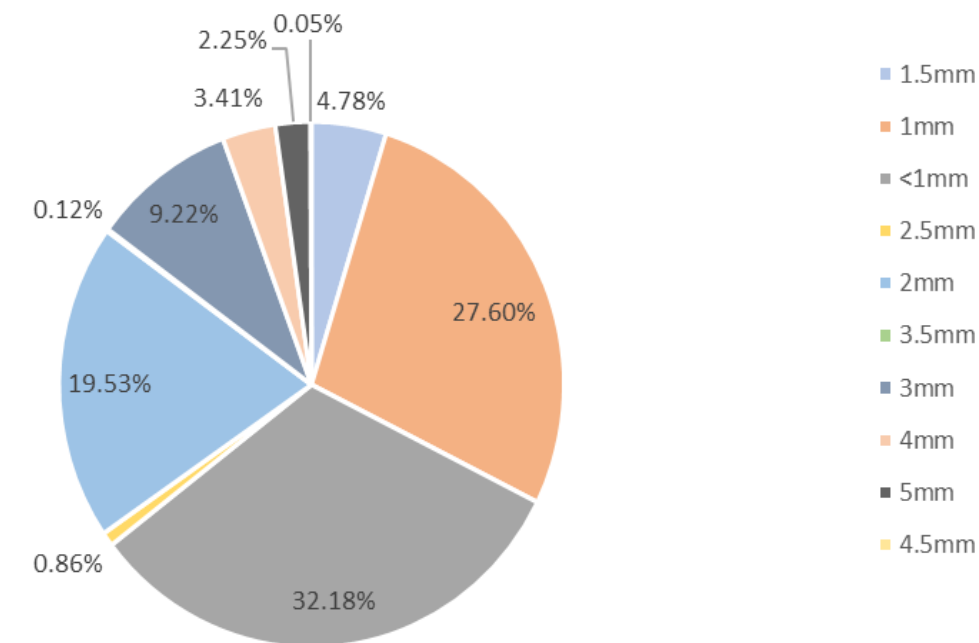


Figura 5. Proporción (%) de tallas de microplásticos encontradas.

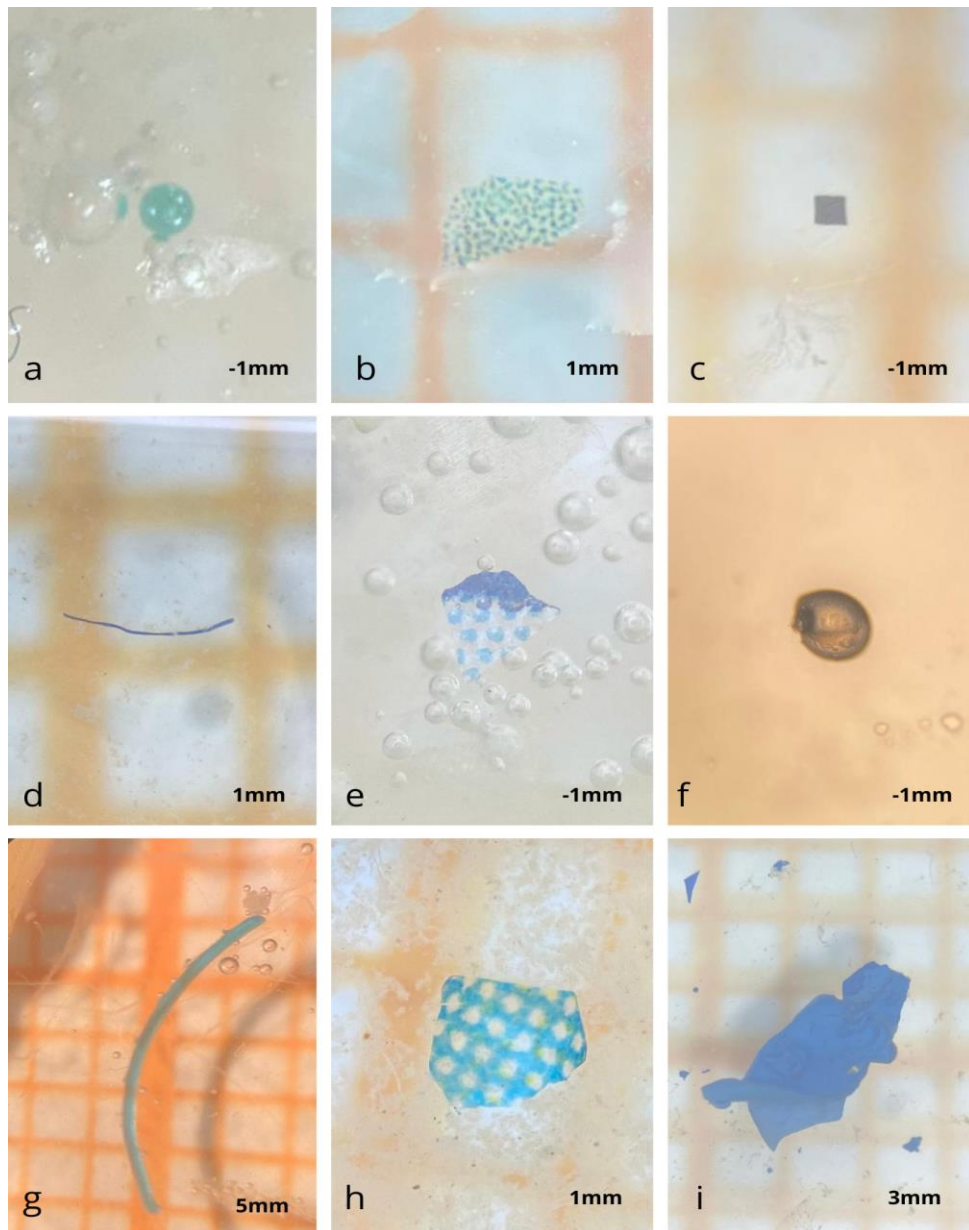


Figura 6. Imágenes de microplásticos encontrados en las muestras obtenidas con ayuda de un microscopio estereoscópico: fibras (d, g), fragmentos (e, i), películas (b, c, h) y microesferas (a, f).

Los resultados indican que en todas las muestras analizadas se encontraron microplásticos, con un predominio de fibras y fragmentos. Los colores más frecuentes fueron azul y transparente, y las tallas predominantes fueron menores a 1 mm (<1mm) y de 1 mm. Las mayores concentraciones se registraron en las estaciones 1 y 5 durante el mes de julio, correspondiente a la temporada de lluvias. Este aumento en la concentración de microplásticos podría estar relacionado con el incremento en la entrada de agua a la cuenca durante esta temporada, prueba de lo anterior son los valores de salinidad que se registraron en este mes (0.21-0.36 UPS) lo que genera un mayor arrastre de sedimentos y agitación de la columna de agua. Además, la estación 1 se ubica cerca de una zona urbana con descargas domésticas, mientras que en la estación 5 se encuentra la descarga de agua de la termoeléctrica Dos Bocas

Las pruebas estadísticas se consideraron significativas con un valor de P de <0.05 . La prueba de normalidad de Shapiro-Wilk mostró valores de p variables entre las estaciones (Tabla 4), lo que indica que los datos no siguen una distribución normal. Por ello, se realizó una prueba de Kruskal-Wallis para evaluar la existencia de diferencias estadísticamente significativas. (Tabla 5 y 6).

Tabla 4. Resultados obtenidos en la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk.

Julio (lluvias)						
Color						
	E1	E2	E3	E4	E5	E6
Shapiro-Wilk	0.4927	0.5527	0.7761	0.7634	0.8234	0.7274
P	8.92E-06	2.63E-05	0.0035	0.0025	0.0131	0.001
Tipo						
Shapiro-Wilk	0.8363	0.6772	0.7968	0.8566	0.8728	0.7743
P	0.1849	0.0061	0.0965	0.2482	0.309	0.0635
Talla						
Shapiro-Wilk	0.7211	0.7921	0.7892	0.8106	0.8424	0.8169
P	0.0015	0.0116	0.0107	0.0195	0.0471	0.0232
Mayo (secas)						
Color						
	E1	E2	E3	E4	E5	E6
Shapiro-Wilk	0.6914	0.7254	0.7151	0.6247	0.6646	0.5367
P	4.55E-04	1.01E-03	0.0007	0.0001	0.0002	1.96E-05
Tipo						
Shapiro-Wilk	0.8778	0.8433	0.8059	0.8661	0.8326	0.6969
P	0.3293	0.2051	0.1132	0.2828	0.1746	0.0106
Talla						
Shapiro-Wilk	0.7548	0.6747	0.6761	0.8125	0.865	0.8409
P	0.004085	0.0004	0.0004	0.0205	0.0872	0.0451
Noviembre (nortes)						
Color						
	E1	E2	E3	E4	E5	E6
Shapiro-Wilk	0.5607	0.7599	0.7369	0.8134	0.8069	0.5847
P	3.06E-05	0.002	0.0013	0.0098	0.0082	4.84E-05
Tipo						
Shapiro-Wilk	0.7733	0.7254	0.8359	0.7731	0.8446	0.8509
P	0.06235	0.0221	0.1837	0.062	0.2092	0.229
Talla						
Shapiro-Wilk	0.7783	0.7941	0.7645	0.7529	0.7458	0.7607
P	0.0078	0.0123	0.0053	0.0038	0.0031	0.0048

La prueba de Kruskal-Wallis, utilizada para comparar las estaciones de muestreo (Tabla 5), indicó que únicamente en el mes de julio se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la variable color ($p= 0.007$). En contraste, no se observaron diferencias significativas en los tipos de microplásticos en ninguno de los meses analizados. De manera similar, el análisis de tallas tampoco mostró diferencias significativas entre estaciones en ningún mes.

Tabla 5. Resultados obtenidos para la prueba de Kruskal-Wallis por estaciones, colores tipo y tallas de microplásticos.

Comparativa por estaciones.					
Julio (lluvias)		Mayo (secas)		Noviembre (nortes)	
Color		Color		Color	
H (chi2):	15.66	H (chi2):	7.534	H (chi2):	7.847
Hc (tie corrected):	15.69	Hc (tie corrected):	7.592	Hc (tie corrected):	8.257
<i>P</i>	0.007	<i>P</i>	0.180	<i>P</i>	0.142
Si hay diferencias.		No hay diferencias.		No hay diferencias.	
Tipos		Tipos		Tipos	
H (chi2):	0.82	H (chi2):	1.24	H (chi2):	0.96
Hc (tie corrected):	0.834	Hc (tie corrected):	1.273	Hc (tie corrected):	1.035
<i>P</i>	0.974	<i>P</i>	0.937	<i>P</i>	0.959
No hay diferencias.		No hay diferencias.		No hay diferencias.	
Tallas		Tallas		Tallas	
H (chi2):	3.148	H (chi2):	2.407	H (chi2):	2.976
Hc (tie corrected):	3.17	Hc (tie corrected):	2.422	Hc (tie corrected):	3.054
<i>P</i>	0.673	<i>P</i>	0.788	<i>P</i>	0.691
No hay diferencias.		No hay diferencias.		No hay diferencias.	

La prueba de Kruskal-Wallis, aplicada para comparar los tres meses de estudio (Tabla 6), reveló diferencias estadísticamente significativas en la variable color ($p= 0.006$) y en los tipos de microplásticos ($p= 0.02$). En contraste, no se observaron diferencias significativas en las tallas de los microplásticos entre los meses analizados.

Tabla 6. Resultados obtenidos de la prueba de Kruskal-Wallis por meses.

Comparativa por meses.					
Color		Tipos		Tallas	
H (chi2):	9.971	H (chi2):	9.256	H (chi2):	2.691
Hc (tie corrected):	9.976	Hc (tie corrected):	9.256	Hc (tie corrected):	2.695
<i>P</i>	0.006	<i>P</i>	0.026	<i>P</i>	0.259
Si hay diferencias.		Si hay diferencias.		No hay diferencias.	

Se llevó a cabo un Análisis de Componentes Principales (PCA) con el objetivo de evaluar la relación entre la presencia de microplásticos y las características hidrológicas del sistema. Los resultados evidenciaron una variabilidad estacional en la distribución de los meses de muestreo, destacándose especialmente julio (J), que muestra una clara diferenciación respecto a mayo (M) y noviembre (N).

En el análisis de parámetros hidrológicos contra los tipos de microplásticos encontrados (Figura 7), el primer componente (PC1) explica el 37.43% de la variabilidad total de los datos, mientras que el segundo componente (PC2) aporta un 22.15%, sumando en conjunto un 59.58% de la varianza total. Esto indica que una gran parte de la estructura de los datos puede ser interpretada a través de estos dos componentes. PC1 está fuertemente asociado con la distribución de los tipos de microplásticos, especialmente fragmentos y microesferas. Por otro lado, PC2 está principalmente relacionado con variables hidrológicas, como la temperatura, el pH y la salinidad.

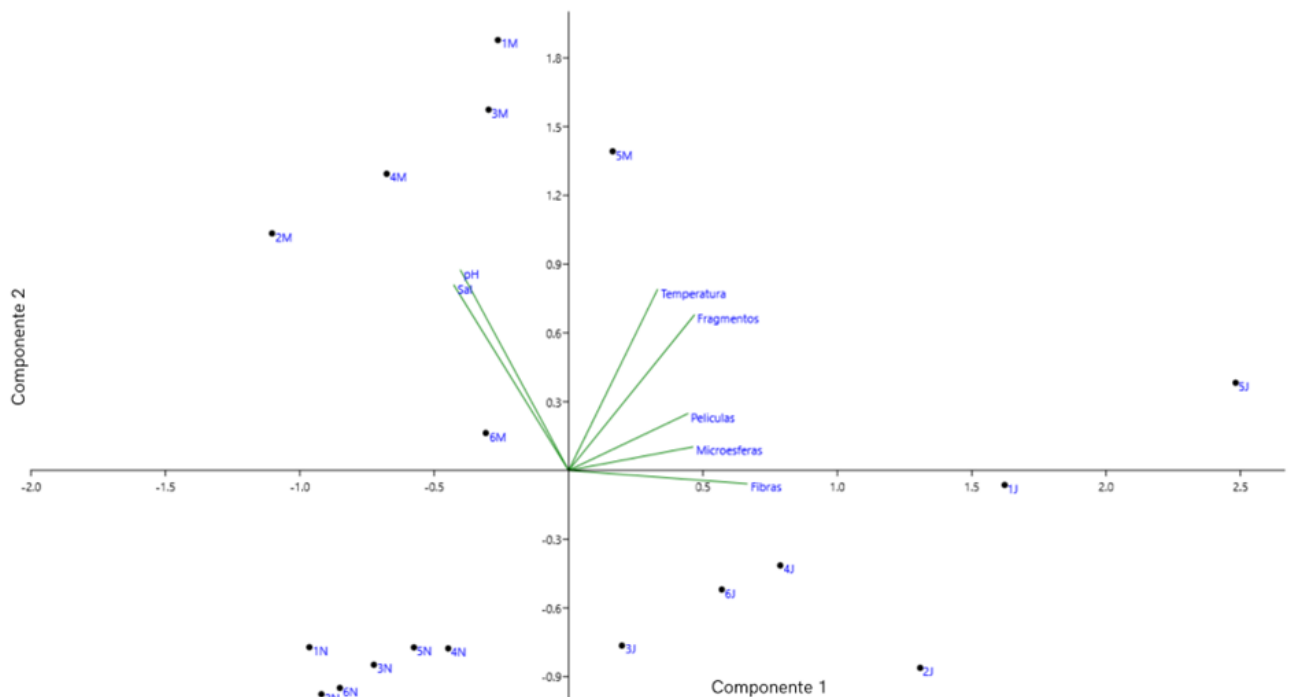


Figura 7. Análisis de componentes principales entre parámetros hidrológicos y tipos de microplásticos (PC1 y PC2)

Por otra parte, el tercer componente (PC3) (Figura 8), que explica el 13.55% de la variabilidad, está influenciado en mayor medida por la presencia de películas plásticas. En tanto, el cuarto componente (PC4), que representa el 16.88% de la varianza, se asocia principalmente con las fibras.

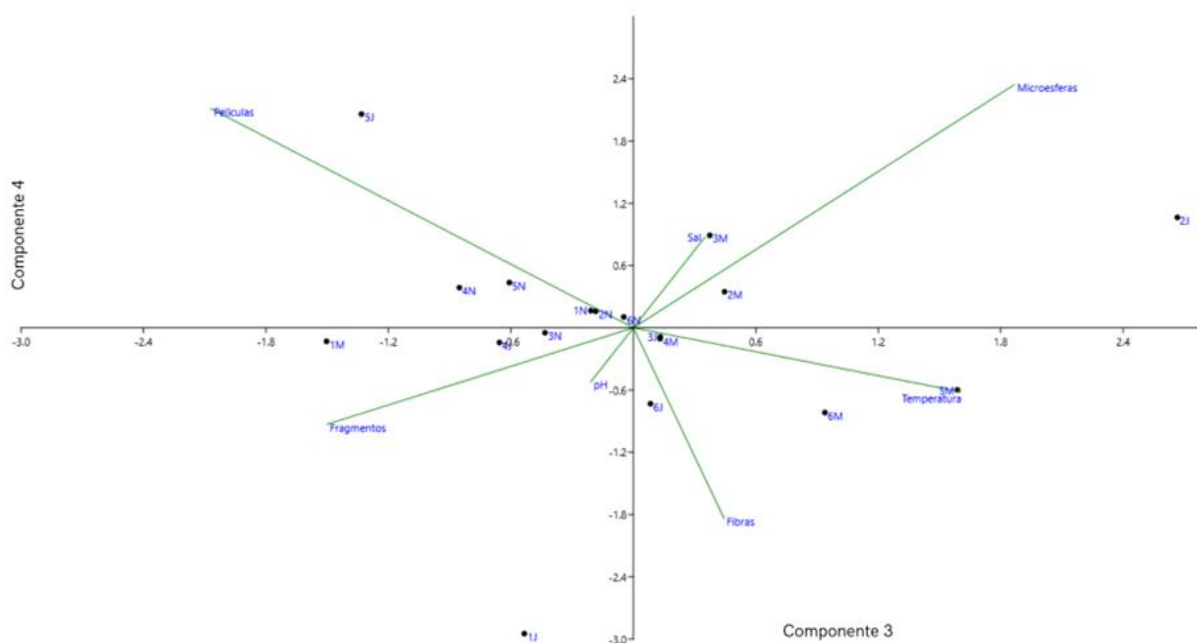


Figura 8. Análisis de componentes principales entre parámetros hidrológicos y tipos de microplásticos (PC3 y PC4).

7.0 DISCUSIÓN

Diversos estudios confirman que los microplásticos se encuentran distribuidos de forma cosmopolita en los ecosistemas acuáticos. La contaminación de los cuerpos de agua ha aumentado considerablemente en las últimas décadas debido a la acumulación de residuos plásticos. Se estima que cada año entre 4.8 y 12.7 millones de toneladas de plástico ingresan a los océanos, afectando gravemente la biodiversidad y la calidad del agua (Jambeck et al., 2015). Esta creciente presencia de plásticos en los ambientes acuáticos representa una amenaza significativa para la vida marina y la salud humana, debido a la persistencia y toxicidad de estos materiales

Salas-Monreal et al. (2020) señalan que en el Arroyo Moreno se distinguen tres temporadas climáticas bien definidas. La primera es la de frentes fríos o nortes, caracterizada por fuertes vientos polares y las temperaturas más bajas del año. Le sigue la temporada de secas, en la que predominan temperaturas elevadas debido a la baja humedad en el ambiente.

Finalmente, la temporada de lluvias se distingue por una alta precipitación y un aumento en la humedad atmosférica, acompañada de una mayor descarga de aguas en la región.

En el estuario periurbano del Arroyo Moreno se encontraron microplásticos en todas las muestras analizadas, obteniendo 4,066 piezas plásticas en total en las tres temporadas climáticas, el mes de julio, correspondiente a la temporada de lluvias, registró la mayor concentración de microplásticos con 2,523 piezas, seguido de la temporada de secas con 1,083 y, por último, la de nortes con 460 piezas. Esto sugiere que las precipitaciones favorecen el arrastre de microplásticos en el sistema, lo que incrementa su aparición en esta temporada. Esto coincide con lo reportado por Pérez-Gómez (2024) en Chiapas, donde también observó la mayor abundancia de microplásticos en la temporada de lluvias. Sin embargo, otros estudios han reportado tendencias diferentes; en Tecolutla Veracruz, Sánchez-Hernández (2018) registró la mayor concentración en la temporada de nortes, seguido de la temporada de secas y, por último, la temporada de lluvias. Esta diferencia podría deberse a factores locales como la hidrología del cuerpo de agua y la cantidad de materiales plásticos en suspensión en cada temporada. De manera similar, Bernal-Apaestegui (2022) en Perú analizó el agua superficial de la quebrada de Yumantay, reporta que la mayor concentración de microplásticos fue en la temporada de secas, lo que coincide con lo reportado por Tsang et al. (2017) en China donde analizo aguas costeras marinas reportó que la temporada seca fue la más contaminada. Esto podría estar relacionado con una menor dilución en ausencia de lluvias, favoreciendo la acumulación de las partículas plásticas.

Las diferencias en la acumulación de los microplásticos en las temporadas climáticas pueden estar influenciadas por la dinámica hidrológica específica de cada región, las fuentes de contaminación y la capacidad del sistema para retener o transportar las partículas en las temporadas climáticas. En el caso del Arroyo Moreno, la alta presencia de microplásticos en la temporada de lluvias podría estar asociada con la acumulación y el arrastre de residuos que bajan por toda la cuenca debido al incremento del flujo del agua, lo que coincide con el estudio de Ruiz-Serrano (2021) y Sánchez-Hernández (2018).

Se identificaron 4 tipos de microplásticos, predominando las fibras (69.89%), seguido de fragmentos (29.24%), películas (0.72%) y en menor proporción las microesferas (0.17%), las cuales solo se encontraron en tres estaciones durante el mes de julio, correspondiente a la temporada de lluvias. Estos resultados coinciden con múltiples estudios como el de Sánchez-Hernández (2018) en Tecolutla Veracruz, quien también reportó una mayor presencia de fibras, seguido de fragmentos, obtuvo 452 partículas plásticas en las tres temporadas climáticas (nortes, lluvias y secas), menciona que los microplásticos de mayor tamaño se encontraron en la temporada de lluvias, lo que respalda la hipótesis de que esta temporada favorece el arrastre de materiales más grandes que posteriormente se fragmentan. De manera similar, Ruiz-Serrano (2021) en la laguna de Catemaco Veracruz identificó que las, fibras, fragmentos y películas fueron los tipos predominantes, durante la temporada de lluvias, encontrando 179 partículas, lo que la vuelve la temporada climática con mayor concentración. A nivel nacional, otros estudios refuerzan esta tendencia, Arcique-Pech (2024) en Quintana Roo registró un total de 190 partículas plásticas en aguas superficiales marinas durante la temporada de secas y lluvias, obtuvo la mayor concentración en la temporada de secas con 105 partículas, predominando las fibras. Por su parte, Valencia-Ramírez (2021) en un estudio

en el lago de Chapala, Jalisco, reportó que las fibras y fragmentos fueron los tipos más comunes.

A nivel internacional varios estudios también han reportado una mayor presencia de fibras en los cuerpos de agua. En Perú, Bernal-Apaestegui (2022) en la quebrada Yumantay encontró que los microplásticos más comunes fueron fibras o filamentos, seguido de fragmentos. En Colombia, Calderón-Quimbaya et. al. (2020) en la columna de agua de un río señaló que las fibras fueron las más abundantes, seguidas de fragmentos y microesferas en menor cantidad, las atribuye a los vertidos de aguas residuales domésticas. Sutton et al. (2016) en California analizó aguas superficiales de la bahía de San Francisco, reportando que las fibras fueron el tipo dominante seguidas por fragmentos.

En China los estudios de Zhao et al. (2014) y Wang et. al. (2017), en lagos urbanos y tramos de algunos ríos, encontraron que las fibras fueron el tipo más común y en el caso de Zhao et. al. (2014) en un estudio donde analizó muestras de agua de un estuario y aguas costeras del mar obtuvo que los gránulos o microesferas y las películas también fueron abundantes, mientras que las microesferas fueron las menos comunes. Por otro lado, Tsang et al. (2017) identificó que los gránulos fueron el tipo más abundante en las aguas superficiales del océano, seguido de fragmentos y fibras, análisis las temporadas húmeda y seca, se obtuvo la mayor concentración de microplásticos en la temporada seca.

La predominancia de fibras en la mayoría de los estudios sugiere que estas pueden estar asociadas con fuentes específicas de contaminación como el vertido de aguas residuales domésticas, la degradación de textiles y el desgaste de las redes de pesca (Calderón-Quimbaya et al., 2020). Su morfología alargada facilita su transporte en los sistemas acuáticos, permitiendo su dispersión a través de corrientes y procesos de re-suspensión (Sánchez-Hernández, 2018). Por otro lado, los fragmentos pueden derivar de la degradación de plásticos de mayor tamaño (Wang et. al., 2017), como envases y empaques, mientras que las películas podrían estar asociadas a bolsas plásticas y recubrimientos (López, 2023).

En cuanto a las tallas se lograron identificar microplásticos con tamaños que oscilaron entre <1 mm y hasta 5 mm, los de menor tamaño (<1 mm, 32.18%) fueron los más abundantes, seguidos por los de 1 mm (27.60%) y 2 mm (19.53%). Se observó que los microplásticos más grandes aparecieron durante el mes de julio correspondiente a la temporada de lluvias, lo que sugiere un arrastre de partículas de mayor tamaño en este periodo, esto coincide con lo que Sánchez-Hernández (2018) reportó en Tecolutla, Veracruz, encontró tamaños menores a 1 mm y de hasta 1.7mm, reportando que los microplásticos más grandes se presentaron en la temporada de lluvias, mientras que los más pequeños los encontró en la temporada de secas. Estudios en otras regiones han obtenido resultados más variables en cuanto a la predominancia de ciertas tallas. Ruiz-Serrano (2021) en Catemaco Veracruz, reportó un predominio de partículas de 5mm, lo que difiere con los resultados obtenidos en el Arroyo Moreno donde este tamaño no fue el más frecuente. Por otro lado, Tsang et al. (2017) en China analizó aguas costeras marinas, encontró microplásticos de <1 mm y de hasta 4 mm, lo que es similar al intervalo de tamaños encontrados. Wang et al. (2017) reportó tamaños menores a 2mm en lagos y ríos, lo que coincide con la alta presencia de partículas de menor tamaño. En California, Sutton et al. (2016) analizó el agua de la bahía de San Francisco, identificó tamaños menores a 1mm, reforzando la idea de que los microplásticos de menor

tamaño suelen ser los más frecuentes en los cuerpos de agua debido a los procesos de degradación y fragmentación.

Las variaciones en las tallas encontradas pueden estar relacionadas con el grado de degradación de los plásticos, la influencia de los procesos hidrológicos y el grado de contaminación de cada sistema (Castañeda-Chávez et al., 2020) Para el caso del Arroyo Moreno, la predominancia de microplásticos menores a 1 mm y la presencia de partículas más grandes en la temporada de lluvias sugieren que las precipitaciones favorecen el transporte de partículas de mayor tamaño, las cuales posteriormente se fragmentan en las temporadas con menor actividad hidrológica.

En el presente estudio se identificaron 13 colores distintos de microplásticos siendo los más frecuentes el azul (36.47%), seguido del transparente (24.87%), negro (9.13%) y rojo en menor cantidad (4.56%), estos resultados coinciden con los hallazgos de Sánchez-Hernández (2018) en Tecolutla Veracruz que reportó que los colores más abundantes fueron negro, azul y rojo, de manera similar Arcique-Pech (2024) en Quintana Roo analizó muestras de aguas superficiales marinas, encontró que los colores predominantes fueron negro, rojo, azul y transparente, lo que coincide con lo obtenido en el Arroyo Moreno.

En otras regiones de México, estudios como el de Reyes-Santillán (2024) analizó el agua de diferentes presas y ríos en el Estado de México y Hernández-Ángeles (2024) en Sinaloa analizó un río donde también identificaron el azul y transparente como colores predominantes, lo que refuerza la tendencia observada en el estudio. Asimismo, Pérez Gómez (2024) en una laguna de Chiapas reportó una alta presencia de microplásticos azules, transparentes, negros, rojos y blancos.

En el contexto internacional, los estudios realizados en China muestran una tendencia distinta. Zhao et al. (2014), Wang et al. (2017) y Tsang et al. (2017) encontraron que los colores predominantes fueron el transparente y el blanco. Por otro lado, en Perú, Bernal-Apaestegui (2022) encontró que los colores más comunes fueron azul, amarillo y rojo, mostrando similitud con nuestros resultados en cuanto a la alta presencia de azul, pero diferencias en la predominancia del amarillo, que no fue un color dominante en los resultados de la investigación.

La predominancia de ciertos colores de microplásticos puede estar influenciada por sus fuentes de origen, las características del plástico en cada región y los procesos de degradación ambiental. El azul, por ejemplo, es común debido a su asociación con fibras sintéticas de redes de pesca y aguas residuales domésticas, además de ser más resistente a la degradación fotoquímica y mecánica (Browne et al., 2011; Andrady, 2017). Por otro lado, el color transparente suele estar relacionado con fragmentos de envases y bolsas plásticas (Wang et al., 2017).

El Análisis de Componentes Principales (PCA) realizado permitió identificar la relación entre la presencia de microplásticos y las características hidrológicas del sistema, destacando variabilidad estacional en la distribución de los meses de muestreo. Julio (J) se mostró claramente diferenciado respecto a mayo (M) y noviembre (N), lo que puede estar relacionado con las condiciones climáticas y los procesos estacionales que influyen en la distribución de los microplásticos. Este hallazgo es consistente con estudios previos que indican que la

estacionalidad juega un papel crucial en la presencia y distribución de microplásticos en cuerpos de agua, especialmente en temporadas de lluvias, donde la escorrentía puede aumentar la concentración de contaminantes (Barnes et al., 2014).

En cuanto a la variabilidad explicada por los componentes principales, el primer componente (PC1), que explica el 37.43% de la variabilidad total, muestra una asociación fuerte con los tipos de microplásticos, especialmente los fragmentos y las microesferas. El segundo componente (PC2), que explica el 22.15% de la variabilidad, se asocia con variables hidrológicas como la temperatura, el pH y la salinidad, lo que subraya la influencia de estas condiciones ambientales en la distribución de los microplásticos. Investigaciones como las de Zhang et al. (2019) también han señalado que las características físico-químicas del agua, como el pH y la salinidad, son determinantes clave en la distribución y acumulación de microplásticos en los ecosistemas acuáticos.

El tercer componente (PC3) del PCA, que explica el 13.55% de la variabilidad, está relacionado con la presencia de películas plásticas, lo que sugiere que estos microplásticos podrían estar asociados con fuentes específicas de contaminación, como el desecho de plásticos de un solo uso. Estudios previos han identificado que las películas plásticas están frecuentemente asociadas con fuentes terrestres, como el lavado de ropa y el uso de plásticos en actividades comerciales y recreativas (Browne et al., 2011; Su et al., 2019). Además, investigaciones en áreas urbanas y costeras, como el estudio realizado por Gómez et al. (2021) en la costa de España, encontraron que la presencia de películas plásticas aumentó en áreas con alta actividad turística, lo que resalta la influencia de las actividades humanas en la distribución de este tipo de microplástico.

Finalmente, el cuarto componente (PC4), que representa el 16.88% de la varianza, se asocia principalmente con las fibras. Las fibras son uno de los tipos de microplásticos más persistentes en los ecosistemas acuáticos, y su presencia en este componente resalta la relevancia de las fuentes de contaminación provenientes de las actividades industriales y el desgaste de textiles sintéticos. Investigaciones como la de Browne et al. (2011) han demostrado que las fibras sintéticas, como las que provienen de las redes de pesca y la ropa sintética, son una fuente importante de microplásticos en los ambientes acuáticos. Esta conclusión también es respaldada por un estudio realizado por Lusher et al. (2017) en el Mediterráneo, que encontró que las fibras fueron predominantes, especialmente en áreas con mayor actividad pesquera y zonas urbanas cercanas.

Los resultados del PCA indican que tanto las condiciones hidrológicas como los diferentes tipos de microplásticos presentan patrones de variabilidad estacional que pueden estar influenciados por factores climáticos y de escorrentía, lo que resalta la complejidad de la contaminación por microplásticos en los ecosistemas acuáticos.

Los resultados obtenidos evidencian que la distribución y características de los microplásticos en el estuario periurbano de Arroyo Moreno están influenciados por múltiples factores, incluyendo las fuentes de contaminación, los procesos de degradación ambiental y la hidrodinámica del sistema. La presencia dominante de ciertos tipos y colores de microplásticos sugiere una estrecha relación con actividades antropogénicas específicas como la pesca, el mal manejo de los residuos plásticos y las descargas de aguas residuales. Además, la variabilidad espacial y temporal observada indica que la acumulación de estos

contaminantes no es uniforme y puede estar determinada por condiciones ambientales como la corriente, la temperatura y la radiación solar, las cuales afectan tanto el transporte como la degradación de los polímeros.

8.0 CONCLUSIONES

- Los estuarios, debido a su dinámica particular, actúan como fuentes de microplásticos para el medio marino. La abundancia de microplásticos en estos ecosistemas es influenciada por diversos factores climáticos, hidrológicos y antropogénicos, los cuales afectan la distribución y concentración de estas partículas. En el caso del estuario periurbano de Arroyo Moreno, se detectaron microplásticos en todas las muestras de agua analizadas, lo que subraya la presencia constante de contaminación en este sistema acuático.
- El análisis reveló que la concentración de microplásticos fue significativamente mayor durante la temporada de lluvias, con un total de 2,532 piezas. Este hallazgo sugiere que las precipitaciones desempeñan un papel crucial en el arrastre de microplásticos hacia el arroyo, al aumentar el flujo de agua y permitir el transporte de estos contaminantes a lo largo de la cuenca.
- Se identificaron cuatro tipos principales de microplásticos: fibras, fragmentos, películas y microesferas. Las fibras fueron las más abundantes, representando el 69.89% del total. Estas fibras provienen principalmente de redes de pesca y descargas de aguas residuales domésticas, lo que refleja las fuentes antropogénicas de contaminación. En cuanto al color de los microplásticos, predominó el color azul, lo que también está relacionado con las redes de pesca.
- En términos de tamaño, predominaron las partículas menores a 1 mm (<1mm), lo que indica una alta fragmentación de los microplásticos en el sistema. Este fenómeno puede estar asociado con la dinámica de los estuarios, donde la constante interacción de las aguas y los sedimentos facilita la descomposición de las partículas más grandes en microplásticos de menor tamaño.
- El análisis de Componentes Principales (PCA) permitió identificar que la variabilidad en la concentración y tipo de microplásticos está influenciada por los parámetros hidrológicos del arroyo. La temperatura se destacó como uno de los factores más importantes, seguido de pH y salinidad, esto sugiere que juegan un papel determinante en la distribución de los microplásticos.
- Es fundamental prestar atención a las grandes cantidades de microplásticos presentes en el Arroyo Moreno, ya que estos contaminantes terminan ingresando al medio marino. Dada la importancia de los estuarios como zonas de transición entre el agua dulce y salada, su papel como fuentes de microplásticos para los ecosistemas marinos debe ser considerado para crear estrategias de manejo ambiental para la reducción de la contaminación por plásticos.

9.0 LITERATURA CITADA

- Aké Castillo, J. et al. (2016). Arroyo Moreno: manglar urbano. Universidad Veracruzana. <https://www.uv.mx/CIENCIAUV/BLOG/ARROYOMORENOMANGLARCIUDAD/>
- Álvarez Zeferino, J. C. (2020). Factores que inciden en la presencia de microplásticos en playas mexicanas (Tesis de doctorado). Universidad Autónoma de Baja California. <https://repositorioinstitucional.uabc.mx/server/api/core/bitstreams/4034e2f0-f711-49ec-aae4-d4b109d02cef/content>
- Andrady, A. (2017). *Microplastics in the marine environment*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X11003055>
- Arcique Pech, E. (2024). Ocurrencia de microplásticos en agua y peces de la zona norte de Quintana Roo (Tesis de maestría). Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/3170/1/PCA_M_Tesis_2024_Maricruz_Evangelina_Arcique_Pech.pdf
- Arthur, C., Baker, J., y Bamford, H. (2009). *Proceedings of the International Research Workshop on the Occurrence, Effects, and Fate of Microplastic Marine Debris*. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-30.
- Barnes, D. K. A., et al. (2014). The impact of marine debris on global biodiversity. *Science*, 345 (6193): 4-5.
- Basáñez Muñoz, A. J. (2018). Ecología de estuarios y lagunas costeras. Universidad Veracruzana. <https://www.uv.mx/pozarica/mmemc/files/2012/10/EE-Ecologia-de-Estuarios-y-Lagunas-Costeras-2016.pdf>
- Bernal Apaestegui, S. (2022). Determinación de la presencia de microplásticos en el agua superficial de la Quebrada Yumantay, Ucayali. Universidad Nacional de Ucayali. <https://repositorio.unu.edu.pe/items/1b75ba16-1670-44fb-bff3-658a1792bde2>
- Browne, A. L., Crump, P., Niven, S., & Teuten, E. (2011). Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: Sources and sinks. *Environmental Science & Technology*, 45(21): 9175-9183. <https://doi.org/10.1021/es201811s>
- Calderón Quimbaya, H., Martínez Silva, P., & Muñoz Yustres, J. L. (2020). *Caracterización y cuantificación de microplásticos en los sedimentos y la columna de agua del río Magdalena en la ciudad de Neiva, Colombia*. Desarrollo e Innovación en ingeniería, Quinta edición. <https://zenodo.org/records/4031208>
- Cantos Iñiguez, M. E. (2019). Estudios de la contaminación marina por plásticos y evaluación de contaminantes derivados de su tratamiento (Tesis doctoral, Universidad de Alicante). https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/92547/1/tesis_maria_esperanza_iniguez_cantos.pdf
- Castañeda Chávez, M. del R., y Lango Reynoso, F. (2021). Impact of the Jamapa River Basin on the Gulf of Mexico. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.97021>

- Castañeta G., Gutierrez A., Nacaratte F. (2020). *Microplásticos: Un contaminante que crece en todas las esferas ambientales, sus características y posibles riesgos para la salud pública por exposición*. <https://www.redalyc.org/journal/4263/426365043004/?utm>
- Chávez López, R. (2022). Revisando los tipos de estuarios de la costa de Veracruz. *Dialnet*. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8833845.pdf>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2014). *Caracterización del Arroyo Moreno*. http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/manglares/doctos/caracterizacion/GM30_Arroyo_Moreno_caracterizacion.pdf
- Cruz Salas, A. (2020). Evaluación de la calidad ambiental y su relación con la presencia de microplásticos en cinco playas mexicanas. Universidad Autónoma Metropolitana. <https://zaloamati.azc.uam.mx/items/fd5b464e-a6d9-4b52-a2ed-cb5228c469f1>
- de Sá, L. et al. (2018). Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: What do we know and where should we focus our efforts in the future?. *Science of The Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.201>
- Galloway, T. S., Cole, M., y Lewis, C. (2017). Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem. *Nature Ecology & Evolution*.
- García Jaramillo, J. et al. (2023). Microplásticos en el contenido estomacal de *Anchoa hepsetus* en Alvarado, Veracruz. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/373160385_Microplastics_Anchoa
- García Villar, A, Montoya Mendoza J, Chavez López R. (2019). Historical Approach of the fish species composition in Arroyo Moreno, Veracruz, México. *BIOCYT*. <https://doi.org/10.22201/fesi.20072082.2019.12.72323>
- Gómez, M., Pérez, J., Alonso, G. (2021). Microplastic pollution in coastal areas: Distribution and sources in tourist destinations. *Environmental Pollution*, 270, 116132. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116132>
- Guzhñay Lozano, C. (2024). Evaluación de la presencia de microplástico en la junta de agua Machángara [Tesis de maestría, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/29359>
- Hammer, O., Harper, D., & Ryan, P. (2001). Past: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeo-Electronica*, https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm
- Hernández Ángeles, J. (2024). Presencia y distribución de microplásticos en agua y sedimento del río Baluarte, Sinaloa, México (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. http://132.248.9.195/ptd2024/ene_mar/0853137/Index.html
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., y Narayan, R. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>

- López del Valle, et al. (2023). Presencia de microplásticos en la columna de agua del Arroyo Moreno durante las tres temporadas climáticas. Repositorio Institucional del Tecnológico Nacional de México. <https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/5106/1/28%20MARTHA%20K%20Y%20FLOR%20YERANIA%20%20PROYECTO%20TESIS.pdf>
- López Monroy, F. (2019). Microplásticos en el ambiente marino. https://www.researchgate.net/publication/339241714_microplasticos_en_el_ambiente_marino_microplastics_in_the_marine_environment
- López J. (2023). Recubrimientos y películas comestibles: ¿reemplazo al plástico tradicional?. Universidad de Chile. <https://inta.uchile.cl/noticias/205882/recubrimientos-y-peliculas-comestibles-reemplazo-al-plastico>
- Lusher, A. L., et al. (2017). "Microplastics in the marine environment: Sources, distribution, and impacts." *Marine Environmental Research*.
- Martínez Gonzáles, V., y Guerrero Rivera, S. (2020). La problemática de los micro y nano plásticos en las costas americanas del océano pacífico. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s2448-56912023000100401&lang=es
- Peralta Peláez, M. K. (2023). Microplásticos en playas dentro del área de influencia del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano (PNSAV), México. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/374464337_Microplastics_in_beaches_within_the_influence_area_of_the_Veracruz_Reef_System_National_Park_PNSAV_Mexico
- Pereiras Varela, M. (2019). Contaminación marina por plásticos. Universidad de La Coruña. https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/24187/PereirasVarela_Manuel_TFG-2019.pdf.pdf
- Pérez Gómez, I. (2024). Diversidad y abundancia de zooplancton y presencia de microplásticos en la laguna Mar Muerto, México. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. <https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/5667>
- Reyes Santillán, C. (2024). Microplásticos en agua: efecto sobre especies seleccionadas de zooplancton y concentraciones en sistemas lóticos y lénticos del centro de México (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. http://132.248.9.195/ptd2025/ene_mar/0865739/Index.html
- Rosado Piña, G. (2018) Caracterización de microplásticos y muestreo de residuos sólidos urbanos de la playa de Tuxpan, Veracruz. https://www.researchgate.net/publication/329454095_Caracterizacion_de_microplasticos_y_muestreo_de_residuos_solidos_urbanos_de_la_playa_de_Tuxpan_Veracruz
- Ruiz Serrano, J. B. (2021). Evidenciación de la presencia de microplásticos en agua, sedimento y tracto digestivo de Tilapia (*Oreochromis aureus*) proveniente de la laguna de Catemaco, Veracruz. <https://rinacional.tecnm.mx/handle/TecNM/1210>
- Salas Monreal, D., Díaz Hernández, A., Áke Castillo, J.A., (2020). Granados Barba, A. y Riverón, M.L. Variación anual de los parámetros hidrográficos en la confluencia del río Jamapa y arroyo Moreno (México). Doi: <http://dx.doi.org/10.21676/23897864.3402>

- Sánchez Hernández L. J. (2018). Evaluación de la presencia de microplásticos en peces comerciales, agua y sedimento del estuario de Tecolutla, Veracruz. <https://bindani.izt.uam.mx/concern/tesiuams/q237hr94j?utm>
- Sánchez, M., García, R., y López, J. (2021). Impacto de los contaminantes plásticos en los ecosistemas marinos del Golfo de México. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sarria Villa, R., y Gallo Corredor, J. (2016). La gran problemática ambiental de los residuos plásticos: Microplásticos. *Journal de Ciencia e Ingeniería*, 8(1). <https://jci.uniautonoma.edu.co/2016/2016-3.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2023). Informe de la política de cambio climático 2023]. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/817333/INFCP_RE__2023.pdf
- Silva, A, Bastos, A, Justino C. (2018). Microplastics in the environment: Challenges in analytical chemistry. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.02.043>
- Su, L., Wang, W., y Zhang, Z. (2019). Sources and characteristics of microplastic pollution in coastal waters: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 146: 608-617. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.016>
- Sutton, R., Mason, S., Stanek, S., y Willis Norton, E. (2016). Microplastic contamination in the San Francisco Bay, California, USA. *Science of The Total Environment*, 566: 1287-1293. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.023>
- Tsang, Y., Mak, C.W., Liebich, C., y Lam, S.W. (2017). Microplastic pollution in the marine waters and sediments of Hong Kong. *Science of The Total Environment*, 607-608, 333-340. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.119>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2024). Los retos de los estuarios. U.S. EPA. <https://espanol.epa.gov/espanol/los-retos-de-los-estuarios>
- Valencia Ramírez, M. (2021). Evaluación de la presencia de microplásticos en el lago de Chapala (Tesis de maestría). Instituto Politécnico Nacional. https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/30462/TESIS%20FINAL_MIRIAM%20VALENCIA%20RAMIREZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Vázquez-Botello, A. (2019). Contaminación en el Golfo de México, orígenes e impactos. *Atmósfera UNAM*. <https://www.atmosfera.unam.mx/eventos/contaminacion-en-el-golfo-de-mexico-origenes-e-impactos/>
- Viršek, M. K. et al. (2016). Protocol for microplastics sampling on the sea surface and sample analysis. *Journal of Visualized Experiments*. <https://doi.org/10.3791/55161>
- Wang, W., Wairimu Ndungu, A., Li, Z., y Wang, J. (2017). Microplastics pollution in inland freshwaters of China: A case study in urban surface waters of Wuhan, China. *Science of The Total Environment*, 584-585, 143-151. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.036>
- Zhang, C. et al. (2016). Toxic effects of microplastic on marine microalgae *Skeletonema costatum*: Interactions between microplastic and algae. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.152>

Zhang, X., et al. (2019). Influence of water quality parameters on microplastic contamination in freshwater environments. *Environmental Science & Technology*.

Zhao, S., Zhu, L., Wang, T., y Li, D. (2014). Suspended microplastics in the surface water of the Yangtze Estuary System, China: First observations on occurrence, distribution. *Marine Pollution Bulletin*, 86(1-2): 567-572. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.07.043>