VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Retención de microplásticos por macrófitas en la cuenca del río Guanajuato

Retention of microplastics by aquatic macrophytes in the Guanajuato River Basin

Luis Carlos Cruz Blake, Alika Enid Gutiérrez Padierna[1], Ma. del Carmen Sánchez Leyva[2], Juan Pablo Huchin Mian*[2]

[1] Licenciatura en Biología Experimental. División de Ciencias Naturales y Exactas. Universidad de Guanajuato, Noria Alta S/N, C.P. 36050. Guanajuato, Gto., México.

[2] Departamento de Biología, División de Ciencias Naturales y Exactas. Universidad de Guanajuato. Noria Alta S/N, C.P. 36050. Guanajuato, Gto., México jp.huchin@ugto.mx

Resumen

Los microplásticos (MPs) son partículas plásticas de un tamaño entre 1 µm y 5 mm que se acumulan en ecosistemas acuáticos, representando una amenaza creciente para la salud ambiental. Las macrófitas acuáticas (es decir, cualquier planta acuática de gran tamaño), debido a sus estructuras radiculares han sido propuestas como una alternativa natural para su retención. El presente estudio evaluó la eficiencia de tres especies de macrófitas lenteja de agua (*Lemna* sp.), oreja de agua (*Heteranthera reniformis*) y commelina (*Commelina diffusa*) en la retención de MPs en afluentes del Río Guanajuato. Además de las macróficas, se recolectaron muestras de agua superficial. Las muestras fueron procesadas mediante digestión con peróxido de hidrógeno (30%) y se filtraron en papel filtro con ayuda de una bomba de vacío. El análisis morfométrico de raíces fue realizado con ImageJ/SmartRoot. Del total de MPs identificados (n=1418), el 91.75% fue retenido en las raíces vegetales, comparado a un 8.25% que se encontraba en el agua superficial circundante, evidenciando la capacidad de biofiltración de las macrófitas. La mayoría de los MPs fueron filamentos negros y azules. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la abundancia de MPs ni en el tamaño de los MPs en las tres especies de macrófitas. Además, se observó una correlación positiva entre el volumen radicular de *Lemna* sp. y la cantidad de MPs retenidos. Estos resultados sugieren que las macrófitas acuáticas constituyen una solución ecológica y viable para mitigar la contaminación por microplásticos en cuerpos de agua dulce.

Palabras clave: microplásticos, plantas, biofiltro, agua superficial

Introducción

Las pequeñas piezas de plásticos, llamadas microplásticos (MPs), miden menos de 5 mm y se ha reportado su presencia de en diferentes partes del cuerpo humano, entre ellos el intestino, sangre, orina, entre otros (Aminzai *et al.,* 2025). Estos MPs que se encuentran en nuestro cuerpo, también se encuentran en prácticamente todos los ecosistemas. Esto lo vuelve una realidad compleja y bastante amplia, debido a que la mayoría de los residuos plásticos que se desechan en vertederos, se incineran o reciclan, no todos son gestionados de forma correcta y terminan en diferentes componentes del medio ambiente como el agua o sedimento.

Los microplásticos (MPs) se clasifican en primarios; es decir, son fabricados originalmente en tamaños pequeños; por ejemplo, aquellos usados en la industria cosmética para exfoliar la piel o en pastas dentales con el objetivo de blanquear los dientes; mientras que los MPs secundarios son aquellos que provienen de producto de la degradación de plásticos de mayor tamaño; por ejemplo, bolsas de plásticos, botellas de bebidas o de utensilios domésticos que al estar en contacto con los factores fisicoquímicos del entorno, como la luz y la temperatura, se resecan y fragmentan a piezas pequeñas. Estos MPs se acumulan en todos los compartimentos del ecosistema, incluidos el agua, sedimento y los animales que pueden confundir los MPs con alimento (Badea *et al.,* 2023).

Debido a la globalización de los últimos 70 años, las naciones del mundo se han vuelto más dependientes de los plásticos. Entre 1950 y 2015, la tasa de crecimiento anual de su producción fue del 8.4 % (Geyer *et al.,* 2017). Los países emergentes suelen adoptar el uso masivo de plásticos, lo que provoca un aumento en la fabricación y el consumo mundial. Las naciones ricas envían cantidades sustanciales de residuos plásticos a países más pobres, donde en muchos casos se gestionan de forma inadecuada, siendo quemados o desechados incorrectamente (Hale *et al.,* 2020).

Frente a esta problemática de acumulación y mal manejo de residuos, surge la necesidad de identificar métodos que permitan mitigar la presencia de MPs en cuerpos de agua dulce. Los ecosistemas acuáticos, particularmente los ríos que se encuentran cerca de zonas urbanas se convierten en receptores directos de MPs provenientes de descargas industriales, residuos de origen doméstico y agrícolas. Estos ríos que se caracterizan por contener altos niveles de nutrientes mantienen una flora muy abundante, dentro de esta se encuentran las macrófitas acuáticas que podrían ser capaces de retener partículas plásticas en sus raíces, tallos y hojas, debido a sus estructuras morfológicas y a la formación de biopelículas que favorecen la absorción de los MPs. Esta capacidad de retención las posiciona como alternativa viable que debe explorarse frente a los métodos convencionales de filtración, como por ejemplo las plantas de tratamiento de aguas residuales. Por ello, la presente investigación tiene como objetivo evaluar la eficiencia de tres especies de macrófitas: lenteja de agua (*Lemna* sp.*)*, oreja de agua (*Heterantera reniformis*) y Commelina (*Commelina diffusa)* en la retención de MPs presentes en afluentes de la cuenca del Río Guanajuato, esto con la finalidad de aportar evidencia sobre su potencial uso en estrategias de mitigación, basados en la naturaleza, de la contaminación plástica en cuerpos de agua dulce.

Materiales y métodos

Sitio de muestreo

Se realizaron muestreos en la cuenca del río Guanajuato en el tramo que conectan con la Presa de Peralillo, ubicada en las afueras de la ciudad de Guanajuato (20° 53' 39" N 101° 15' 27" W) (Figura 1).



Figura 1. Mapa de la cuenca del río Guanajuato que muestra la ubicación elegida para el muestreo de macrófitas.

Recolección de muestras

Se realizó el muestreo de macrófitas y agua superficial en uno de los principales afluentes de la cuenca del río Guanajuato que desemboca en la Presa la Purísima. La colecta de agua superficial se realizó por triplicado en frascos de vidrio claro de 1 L a lo largo de tres sitios; por otro lado, las macrófitas fueron colectados en siete sitios de muestreo, en donde se obtuvieron por triplicado, 100 g de biomasa de las especies de plantas presentes en el afluente y se colocaron en bolsas Ziploc grandes (26.8 cm x 27.3 cm). Las especies recolectadas fueron lenteja de agua (*Lemna* sp.), oreja de agua (*Heteranthera reniformis*) y commelina (*Commelina diffusa*). Posteriormente, al llegar al laboratorio, las muestras fueron inmediatamente congeladas (-4 °C).

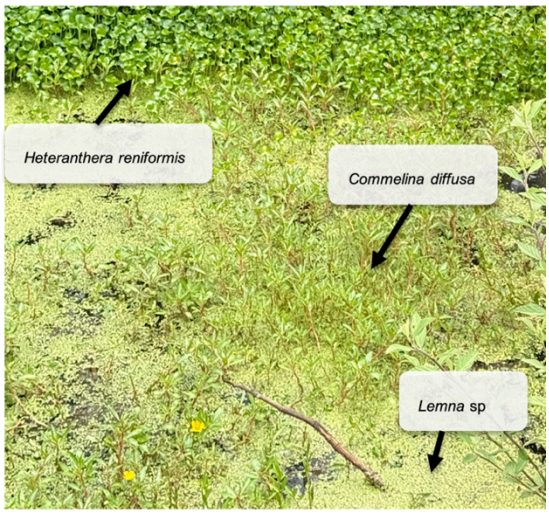


Figura 2. Macrófitas acuáticas evaluadas en el estudio: Lemna sp., *Heteranthera reniformis, y Commelina difusa.*

Procesamiento de agua superficial

Para este procedimiento primero se conectó la bomba de vació al matraz Kitazato mediante una manguera de hule. Después se colocó en el sistema de filtración un papel filtro (diámetro de 4.44 cm) y posteriormente las muestras de agua superficial fueron decantadas en el sistema permitiendo que los MPs quedarán atrapados en el filtro. Para las muestras que contenían una cantidad considerable de materia orgánica fue necesario realizar primero una digestión con peróxido de hidrógeno al 30% a una temperatura de 60-70 °C. El filtro era reemplazado después de filtrar aproximadamente cada 300 mL o cada vez que se obstruye el sistema de filtración. Después del filtrado, cada filtro era colocado en cajas Petri de vidrio y fueron cuidadosamente etiquetados según el sitio de muestreo. Los filtros fueron observados bajo microscopios estereoscópicos (Stemi 305, Zeiss) para identificar la presencia de los MPs. Cuando se encontraban los MPs se colectaban con la punta de jeringas de 1 mL y se traspasaban en un filtro limpio y estéril ubicado en una caja Petri de plástico etiquetada con el número de sitio y la especie o tipo de muestra donde fue aislada. Finalmente se contabilizaban los MPs encontrados y se caracterizaban según su color y forma (filamento, fragmentos, film o esfera).

Procesamiento de materia vegetal

Antes del procesamiento de muestras vegetales, y para evitar contaminación cruzada con MPs del entorno,

todos los materiales utilizados fueron lavados con agua destilada. A los 100 g de biomasa de *Heteranthera reniformis* y *Commelina diffusa* se les cortó la estructura radicular, mientras que *Lemna* sp. se procesó la biomasa completa, luego fueron colocadas en un tamiz de 850 μm encima de un vaso de precipitado y se realizaron lavados con un litro de agua destilada. Al finalizar con los lavados, el agua presente en el recipiente se vertía en un frasco de vidrio claro de 1 L previamente etiquetado con el sitio, especie y réplica. Teniendo el agua en los frascos se dejaban mínimo un día para dejar que se asentara el sedimento. Posteriormente el líquido se separaba del sedimento por decantación, y se realizaba el mismo procedimiento de filtrado realizado con el agua superficial. Por último, la biomasa de las macrófitas lavadas fueron secadas con papel absorbente y pesadas para obtener el peso húmedo de cada réplica.

Mediciones de raíces de *Lemna* sp.

La medición de la estructura radicular solamente fue realizada en *Lemna* sp., debido a que contiene entre una a cinco raíces por fronda, comparado con *H. reniformis* y *C. diffusa* que contenían cientos de raíces secundarias que complicaba su medición son nuestros métodos de análisis. Para realizar las mediciones de *Lemna* sp, primero se les tomó una fotografía en un fondo blanco junto a una pieza de hoja milimétrica como referencia y se utilizó el programa ImageJ con la extensión SmartRoot para realizar las mediciones de longitud, superficie y volumen de las raíces. Además, en este mismo programa se realizaron las mediciones de los tamaños de los MPs encontrados en todas las macrófitas y el agua superficial.



Figura 3. *Microfotografía de fibras de MPs retenidas en filtro. Se observan fibras filamentosas de diferentes colores y longitudes, dispersas sobre el sustrato del filtro. Barra de escala = 1000 µm.*

Análisis de datos

La morfología y el color de los MPs encontrados en el estudio fueron reportados mediante análisis descriptivo y no incluyó pruebas de inferencia estadística. Por otro lado, para aquellos datos al que se aplicaron análisis estadísticos, primero se determinó la distribución de los datos para posteriormente seleccionar la prueba estadística adecuada (paramétrica o no paramétrica). Se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk y homogeneidad de varianza con la prueba de Levene a cada conjunto de datos antes de realizar comparaciones. Para comparar la abundancia promedio de MPs según la especie de macrófitas se realizó una prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis debido a la ausencia de distribución normal de los datos (Shapiro-Wilk, $p < 0.05$). Posteriormente, para identificar entre qué especies existían diferencias significativas

se aplicaron comparaciones pareadas mediante la prueba de Wilcoxon. Asimismo, se aplicó una prueba de Kruskal-Wallis para comparar el tamaño de MPs aislados entre las macrófitas. Se aplicó una regresión lineal entre morfometría radicular y abundancia de MPs en *Lemna* sp encontrado por sitio. Con los datos de longitud, superficie y volumen radicular obtenidos mediante ImageJ/SmartRoot para las réplicas de *Lemna* sp., se generaron diagramas de dispersión enfrentando cada variable morfométrica contra la abundancia de MPs retenidos, ajustando una línea de tendencia lineal a cada relación para evaluar el sentido (positivo o negativo) y la fuerza aparente de la asociación. Este análisis se restringió a *Lemna* sp. por ser la única especie a la que se le realizó la caracterización morfométrica completa de la raíz. Los análisis estadísticos fueron realizados en el software R (versión 4.6.1.) utilizando en todos los casos un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Resultados

Abundancia de MPs

Se encontró un total de 117 MPs en el sitio de muestreo para el agua superficial circundante a la vegetación, teniendo un promedio por sitio de 5.57 MPs. Del total de MPs encontrados en todas las muestras (n=1418), tan solo el 8.25% (n=117 MPs) fue recolectado en las muestras de agua superficial, mientras que el otro 91.75% (n=1301) fue recolectado en las muestras vegetales.

Todas las macrófitas analizadas presentaron MPs entre sus raíces. Sin embargo, la abundancia promedio de MPs retenidos por las especies vegetales fue similar entre ellas. En *C. difusa* el promedio fue de 37.8 MPs por 100 g de materia vegetal analizada, mientras que en *H. reniformis* fue de 23.8 MPs y de 24.8 MPs en el caso de *Lemna* sp., (Figura 4). No se encontraron diferencias significativas en la abundancia promedio de MPs retenidos en las tres especies de macrófitas (Kruskal-Wallis, p=0.1288).

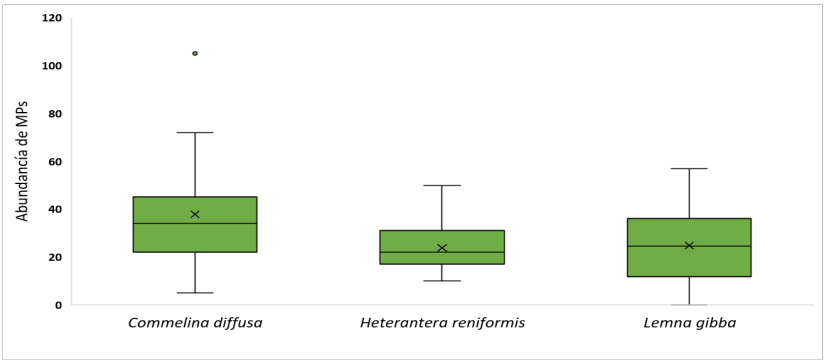


Figura 4. *Distribución de la abundancia promedio de microplásticos (MPs) capturados por las raíces de Commelina diffusa, Heteranthera reniformis y Lemna sp. Las cajas representan el rango intercuartílico, la línea horizontal indica la mediana, la "×" señala la media.*

Morfología de MPs

Se encontraron dos morfologías de MPs en las muestras de plantas: filamentos y fragmentos. En *Commelina diffusa* el 93.92% (n=557) de los MPs aislados fueron filamentos y el 6.08% (n=36) correspondió a fragmentos; mientras que en *Lemna* sp. el 100% (n=507) fueron filamentos, y finalmente para *Heteranthera reniformis* el 97.55% (n=279) fueron filamentos y un 2.45% (n=7) de fragmentos (Figura 5).

Colores de MPs

Se encontró una diversidad de colores bastante amplia en los MPs aislados en las macrófitas, pero predominaron el negro y azul en las tres especies analizadas (Figura 6). En *Lemna* sp., los MPs negros representaron el 49.6 % (n = 251) y los azules el 32.4 % (n = 164) del total de partículas, seguidos por el blanco-transparente (7.9 %), rojo (6.9 %) y verde (2.4 %). En *Commelina diffusa* el patrón fue similar pero más marcado, con el negro alcanzando el 69.2 % (n = 295) y el azul el 24.9 % (n = 106), mientras que el resto de los colores (rojo, blanco y otros) no superó en conjunto el 6 % de las partículas. Por su parte, en *Heteranthera reniformis* los MPs negros representaron el 56.8 % (n = 162) y el azul el 33.7 % (n = 96), con el rojo, blanco, verde y otros colores conformando el restante 9.6 %.

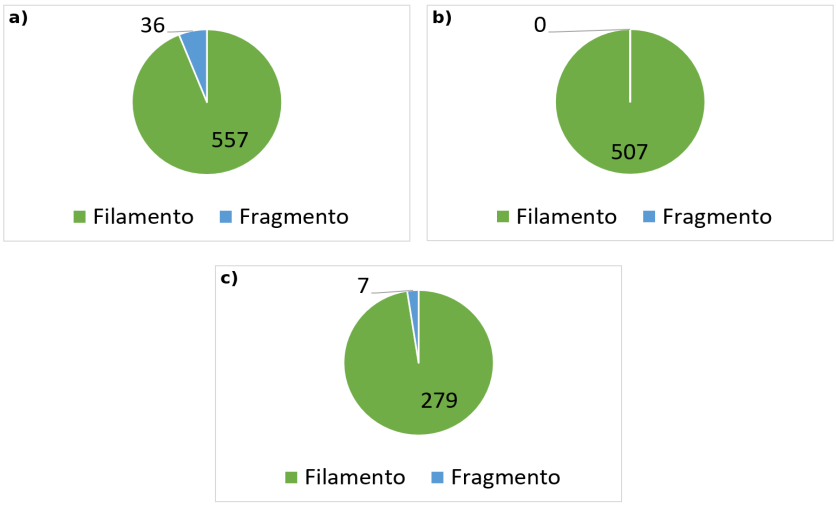


Figura 5. *Proporción de la morfología de microplásticos (filamentos y fragmentos) capturados por las raíces de las especies de macrófitas estudiadas: a) Commelina diffusa, b) Lemna* sp. *y c) Heteranthera reniformis. Los valores indican el número total de partículas identificadas en cada categoría morfológica.*

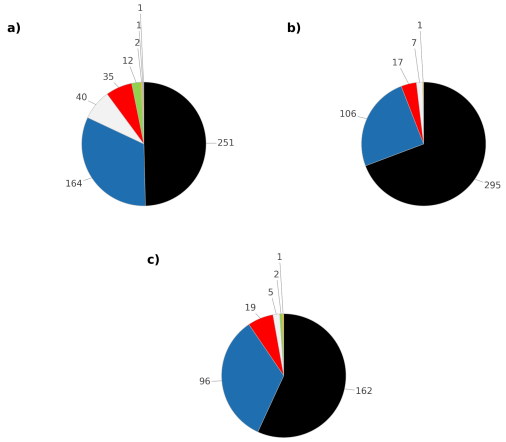


Figura 6. Cantidad de microplásticos por color en a) Lemna sp., *b) Commelina diffusa y c) Heteranthera reniformis.*

Tamaño de MPs

El tamaño promedio de los MPs aislados en las macrófitas mostró poca variación en *Commelina diffusa* (1353.2 µm) *Heteranthera reniformis* (1410.1 µm), y *Lemna* sp (1059.9 µm); por lo tanto, no exhibieron diferencias significativas (Kruskal-Wallis, p = 0.1595), indicando que la capacidad de retención de MPs en las macrófitas no está asociado al tamaño de las partículas que flotan en el agua superficial (Figura 7).

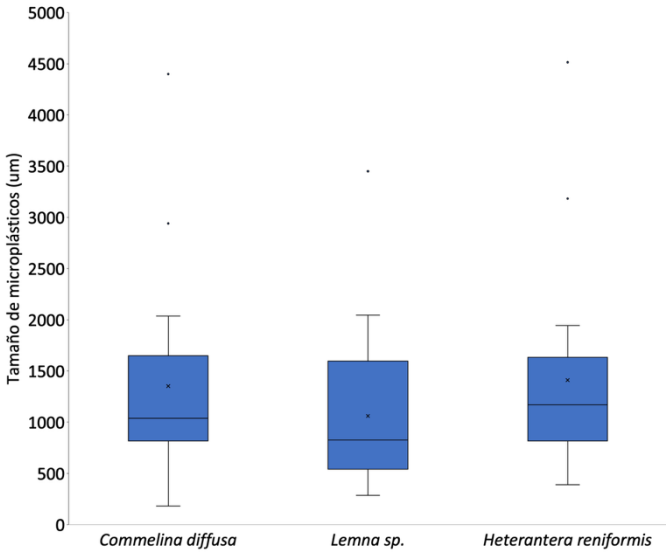


Figura 7. Distribución de los tamaños de microplásticos en Commelina diffusa, Lemna sp. y Heteranthera reniformis.

Abundancia de MPs y la longitud, superficie y volumen en *Lemna* sp.

El promedio de longitud por raíz que se obtuvo en *Lemna* sp. fue de 17.83 mm, el promedio de la superficie por raíz fue de 12.89 mm² y el promedio de volumen por raíz fue de 0.92 mm³. El nivel de asociación entre las variables analizadas fue bajo y no significativo para las tres especies vegetales (Figura 8).

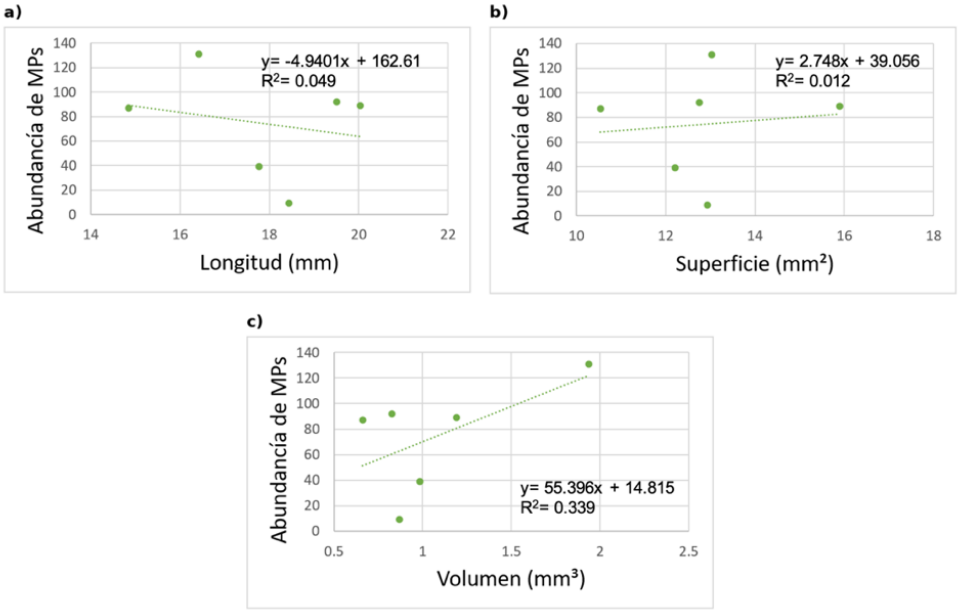


Figura 8. *Relación entre la morfología radicular de Lemna sp. y la abundancia de microplásticos (MPs) capturados. a) Longitud de la raíz, b) superficie radicular y c) volumen radicular (mm³).*

Concentración de MPs por peso húmedo de biomasa

La concentración de MPs por peso húmedo de biomasa fue similar solamente entre las dos especies comparadas. *Commelina diffusa* presentó una media de 2.87 MPs/g, ligeramente superior, mientras que *Heteranthera reniformis* fue de 2.24 MPs/g, pero no representaron diferencias significativas entre ambas especies (Mann-Whitney, $p = 0.59$).

Discusión

Los datos obtenidos de las especies de plantas con las que se realizó el estudio presentaron una mayor afinidad para la captación de MPs con morfología de filamento. Esto se lo podemos atribuir a la mayor probabilidad de enredo mecánico entre las fibras y las estructuras filamentosas de las raíces, así como a su menor velocidad de sedimentación, lo que prolonga su tiempo de suspensión en la columna de agua y aumenta la probabilidad de contacto con la superficie vegetal. En contraste, los fragmentos, al ser partículas más compactas y con un único punto de contacto posible, dependen únicamente de la adhesión superficial, lo que reduce su retención neta por las plantas. Aun así, de las tres especies estudiadas la que obtuvo una mayor retención de fragmentos fue *Commelina diffusa* y esto se le atribuyó a que cuenta con una estructura radicular mucho más compleja a comparación de las otras dos especies y es posible que esto aumentará la probabilidad de adhesión de estos fragmentos encontrados. Aun así, Miloloža et al. (2025) sugieren que la explicación no necesariamente tendría que ver con las macrófitas como tal, sino con el ambiente donde se encuentren las plantas, ya que al realizar un humedal artificial y evaluar la retención de MPs descubrieron que el sistema retenía más del 99% de partículas independientemente de que vegetación estuviera presente. Además, una posible explicación de porque no se encontró una diferencia significativa en la retención de MPs por cada especie. Si se toma en cuenta que las muestras fueron colectadas en un mismo ecosistema acuático, podría explicar el hecho de que la retención de partículas tiene que ver más con el ambiente homogéneo de donde se tomaron las muestras y no tanto por las diferentes morfologías que presentaba cada planta. Esto se respalda por lo obtenido en el análisis de datos de este estudio.

Los resultados de este estudio mostraron una predominancia de MPs negro y azul en las tres especies analizadas, lo cual coincide con lo reportado en otros estudios sobre contaminación por MPs en cuerpos de agua, donde estos colores suelen ser los más abundantes (Hale et al., 2020; Badea et al., 2023). La alta proporción de MPs negros podría estar asociada a fuentes como el desgaste de neumáticos, partículas de asfalto o fragmentos de plásticos degradados que pierden su color original y se oscurecen por procesos de fotooxidación (Badea et al., 2023). Por su parte, los MPs de color azul suelen vincularse con fibras textiles, cuerdas o artes de pesca, así como con fragmentos de envases plásticos de un solo uso, cuya presencia en cuerpos de agua ha sido documentada ampliamente (Bhardwaj et al., 2024).

El tamaño de los MPs entre las especies vegetales estudiadas fue similar. Esto sugiere que el tamaño de las partículas depende más de las características del ambiente y de los procesos de degradación de los MPs. Existen pocos estudios sobre la retención de MPs según su tamaño específicamente en plantas acuáticas; sin embargo, este patrón es consistente con lo reportado por Sfriso et al., 2021, mediante un estudio realizado con macrófitas marinas (15 especies de macroalgas), donde encontraron que la acumulación de microplásticos seguía un patrón específico de los sitios muestreo más que de las especies, lo cual respalda la idea de que las condiciones ambientales determinan la cantidad y tamaño de los MPs retenidos por las macrófitas. Los valores atípicos de mayor tamaño encontrados en las tres especies se atribuyen a fragmentos de incorporación más reciente o un proceso de fragmentación incompleto, mientras que las partículas de rangos típicos corresponden a MPs con mayor tiempo de exposición ambiental. Esto es reforzado gracias a lo encontrado en la bibliografía, ya que la homogeneidad en el tamaño puede explicarse por la naturaleza del proceso de fragmentación de los plásticos en el ambiente, según Zhang et al., 2021, la exposición prolongada a radiación UV, esfuerzos mecánicos ejercicios por el agua y procesos de oxidación degradan progresivamente los plásticos de mayor tamaño hasta convertirlos en MPs, generando una diversidad de tamaños (macro, meso y microplásticos) que no depende del organismo que lo capta, sino, condiciones ambientales a las que ha estado expuesto el material original.

La ausencia de correlación con la longitud radicular, en contraste con la sí observada para volumen y superficie, puede explicarse porque estas dos últimas variables reflejan de forma más directa el área de contacto físico disponible para la adhesión y el atrapamiento de partículas, mientras que la longitud, al ser una medida unidimensional, no captura variaciones en el diámetro o la ramificación de la raíz que determinan la superficie real expuesta (Tachibana & Ohta, 1983).

El análisis de biomasa realizado con peso húmedo entre las especies *Commelina diffusa y Heteranthera reniformis* sugiere que, a pesar de las diferencias morfológicas, presentan una capacidad similar de retención de MPs en su tejido. Esto es consistente con lo señalado por Huang et al., 2023, quienes reportan que la abundancia de MPs en plantas acuáticas y macroalgas puede variar en magnitudes entre especies, siendo las especies de morfología filamentosa las que suelen retener más partículas debido al enredo físico de fibras y fragmentos en su estructura; En este mismo sentido, Mateos-Cárdenas et al., 2021, señalan que la retención de microplásticos en macrófitas acuáticas depende en gran medida de la morfología foliar y de estructuras superficiales, los cuales facilitan la adhesión física de las partículas. La alta variabilidad observada en *Commelina diffusa* podría estar relacionada con una mayor exposición a fuentes de contaminación dentro del sitio de muestreo, más que con una diferencia en la capacidad de retención entre especies. Cabe destacar que el uso de peso húmedo como medida de biomasa pudo haber contribuido a esta variabilidad, ya que el contenido de agua en el tejido vegetal puede generar una fluctuación bastante amplia entre especies; por lo anterior, se recomienda que estudios futuros determinen la concentración de MPs utilizando el peso seco de la vegetación, con el fin de reducir la variabilidad y obtener comparaciones más precisas entre especies.

La baja cantidad de MPs encontrados en las muestras de agua superficial puede demostrar que las macrófitas acuáticas podrían ser consideradas como un biofiltro al haber retenido un 91.75% del total de MPs recolectados en el sitio de muestreo, estos datos concuerdan con el estudio realizado por Li et al. (2024) donde en un sistema optimizado con flujo controlado, aireación y densidad de plantas ajustada, se logró una retención promedio de microplásticos del 93.38%. En sistemas de transición, estas plantas actúan además como sumideros temporales de microplásticos, aunque su capacidad de retención puede variar más en función del sitio de muestreo que de la especie particular (Sfriso et al., 2021). A pesar de que la mayoría de las partículas encontradas fueran filamentos, esto puede considerarse como un avance y contener datos importantes que nos permitan crear metodologías a futuro que permita utilizar las propiedades que estas plantas ya tienen de manera natural y poder contener una problemática que cada día se vuelve más complicada.

Conclusión

Los datos obtenidos por este estudio permiten demostrar que las macrófitas acuáticas pueden ser una solución amigable con el ambiente, viable para la problemática de contaminación por MPs en ecosistemas acuáticos ya que se demostró que estas cuentan con una gran capacidad para retener estas partículas de plástico. Esto es respaldado por los datos obtenidos en la zona donde se realizó el muestreo, se encontró que conforme avanzaba el cauce la cantidad de MPs encontrados en el agua superficial disminuyó hasta prácticamente no tener microplásticos (Datos no publicados). La problemática de MPs es cada vez mayor y el encontrar soluciones basadas en la naturaleza puede ser una noticia alentadora para seguir combatiendo esta crisis de contaminación ambiental.

Referencias

Aminzai, M.T., Yildirim, M., Yabalak, E. (2025). Microplastics in the human body and environment: Pathways, health impacts, detection, and removal strategies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13, 119200. https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.119200

Badea, M. A., Balas, M., & Dinischiotu, A. (2023). Microplastics in freshwaters: Implications for aquatic autotrophic organisms and fauna health. *Microplastics*, *2*(1), 39–59. https://www.mdpi.com/2673-8929/2/1/3

Başaran Kankılıç, G., Koraltan, İ., Erkmen, B., Çağan, A. S., Çırak, T., Özen, M., Seyfe, M., Altındağ, A., & Tavşanoğlu, Ü. N. (2023). Size-selective microplastic uptake by freshwater organisms: Fish, mussel, and zooplankton. *Environmental Pollution*, *336*, Article 122445. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749123014471

Bhardwaj, L. K., Rath, P., Yadav, P., & Gupta, U. (2024). Microplastic contamination, an emerging threat to the freshwater environment: A systematic review. *Environmental Systems Research*, *13*, Article 8. https://environmentalsystemsresearch.springeropen.com/articles/10.1186/s40068-024-00338-7

Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L., & Zeng, E. Y. (2020). A global perspective on microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *125*(1), Article e2018JC014719. https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2018JC014719

Li, C., Shi, Y., Zhu, W., Luo, D., Bai, X., & Krause, S. (2024). A low-impact nature-based solution for reducing aquatic microplastics from freshwater ecosystems. *Science of the Total Environment*. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135424015318

Li, Y., Tao, L., Wang, Q., Wang, F., Li, G., & Song, M. (2023). Potential health impact of microplastics: A review of environmental distribution, human exposure, and toxic effects. *Environmental Health*, *1*(4), 249–257. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/envhealth.3c00052

Mateos-Cárdenas, A., van Pelt, F. N. A. M., O'Halloran, J., & Jansen, M. A. K. (2021). Adsorption, uptake and toxicity of micro- and nanoplastics: Effects on terrestrial plants and aquatic macrophytes. *Environmental Pollution*, *284*, Article 117183. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026974912100765X

Miloloža, M., Putar, U., Starin, M., Novak, J., & Kalčíková, G. (2025). Understanding microplastic retention in surface flow constructed wetlands: The impact of aquatic macrophytes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *13*(2), Article 116097. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343725007936

Sfriso, A. A., Tomio, Y., Juhmani, A. S., Sfriso, A., Munari, C., & Mistri, M. (2021). Macrophytes: A temporary sink for microplastics in transitional water systems. *Water*, *13*(21), 3032. https://www.mdpi.com/2073-4441/13/21/3032

Tachibana, Y., & Ohta, Y. (1983). Root surface area, as a parameter in relation to water and nutrient uptake by cucumber plant. *Soil Science and Plant Nutrition*, *29*(3), 387–392. https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00380768.1983.10434642

Zhang, K., Hamidian, A. H., Tubić, A., Zhang, Y., Fang, J. K. H., Wu, C., & Lam, P. K. S. (2021). Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review. *Environmental Pollution*, *274*, Article 116554. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749121001329