

## Desarrollo y evaluación de un protocolo adaptado para la extracción de microplásticos en suelos urbanos

Andrea Zambrano-Arizpe <sup>1</sup>, Teresa de Jesús Montalvo-Herrera <sup>1</sup>, Mario Jesús Muñoz-Batista <sup>2</sup>, Mónica Calero-de Hoces <sup>2</sup>, David Clemente López-Pérez <sup>3</sup>, Astrid Iriana Sánchez-Vázquez <sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Materiales III, Departamento de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, Nuevo León, México

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Granada, Granada, Andalucía, España

<sup>3</sup> Departamento de Hidráulica, Instituto de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, Nuevo León, México

\* Autor de correspondencia: [astrid.sanchezvz@uanl.edu.mx](mailto:astrid.sanchezvz@uanl.edu.mx)

**Contaminación del agua, suelo y aire** (Monitorio de contaminantes)

Recibido: 11 de junio de 2025

Aceptado: 13 de julio de 2025

Publicado: 30 de diciembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.495>

**Resumen:** La contaminación por microplásticos en suelos urbanos es un problema ambiental emergente que amenaza tanto la salud de los ecosistemas urbanos como la salud humana. Este estudio se enfoca en analizar los desafíos asociados al muestreo y extracción de microplásticos en suelos urbanos del Área Metropolitana de Monterrey (AMM), así como en proponer estrategias que optimicen tanto la recuperación de los microplásticos, como su posterior análisis en laboratorio. Se realizaron muestreos de suelo superficial en cuatro campus universitarios del AMM, seleccionados por su alta densidad poblacional y variedad de actividades humanas. Para el muestreo de los sitios se siguieron normativas mexicanas y se empleó un diseño de muestreo combinado (por juicio y aleatorio). Los microplásticos fueron extraídos a través de digestión orgánica con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y separación por densidad utilizando ZnCl<sub>2</sub>, y su posterior identificación se realizó por microscopía óptica. Los resultados revelaron la presencia de diversos morfotipos de microplásticos, como fragmentos, fibras, films y pellets. Sin embargo, la extracción no resultó completamente eficiente debido a la presencia de materia orgánica y a la recuperación ineficaz de los microplásticos más pequeños en el filtro, lo que dificultó su posterior caracterización química. Además, la toxicidad y el alto costo de los reactivos utilizados, como el ZnCl<sub>2</sub>, representaron limitaciones en la metodología. En consecuencia, este estudio subraya la necesidad de investigar alternativas más sostenibles y eficientes para optimizar el proceso de análisis en el laboratorio.

**Palabras clave:** microplásticos, muestreo de suelo, extracción de microplásticos, suelo urbano

## Development and assessment of an adapted protocol for the extraction of microplastics in urban soils

**Abstract:** Microplastic pollution in urban soils is an emerging environmental issue that threatens both urban ecosystem health and human well-being. This study focuses on analyzing the challenges associated with sampling and extracting microplastics from urban soils in the Monterrey Metropolitan Area (MMA), and on proposing strategies to optimize both collection and laboratory analysis. Surface soil samples were collected from four university campuses within the MMA, selected due to their high population density and variety of human activities. Site sampling followed Mexican regulations and employed a combined design (judgmental and random sampling). Microplastics were extracted through organic matter digestion with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and density separation using ZnCl<sub>2</sub>, followed by identification through optical microscopy. The results revealed the presence of various microplastic morphotypes, such as fragments, fibers, films, and pellets. However, the extraction process was not fully efficient due to the presence of organic matter and the poor recovery of smaller microplastics on the filter, which hindered their subsequent chemical characterization. Moreover, the toxicity and high cost of reagents such as ZnCl<sub>2</sub> posed limitations to the methodology. Consequently, this study highlights the need to explore more sustainable and efficient alternatives to optimize the laboratory analysis process.

**Keywords:** microplastics, soil sampling, microplastic extraction, urban soil

### Introducción

La contaminación ambiental por microplásticos representa una seria amenaza a la preservación y al aprovechamiento sostenible de los recursos naturales. Estos polímeros pueden ingresar a los ecosistemas a través de diversas actividades antropogénicas como el vertido ilegal de desechos plásticos, la liberación accidental durante su manufactura y traslado, o el inadecuado manejo de los residuos sólidos urbanos (Lamichhane *et al.*, 2023). Desafortunadamente, estos plásticos no desaparecen en el ambiente, sino que se fragmentan en pedazos cada vez más pequeños, hasta llegar a ser partículas microscópicas, conocidas como microplásticos (< 5 mm).

Actualmente, gran parte de los estudios sobre los efectos nocivos, la abundancia y la distribución de los microplásticos se han enfocado principalmente en los ecosistemas acuáticos y marinos, donde se estima que cada año ingresan aproximadamente 10 millones de toneladas de (micro)plásticos a los océanos (Alvarado-Zambrano *et al.*, 2023; Borges Ramírez *et al.*, 2019; Cruz-Salas *et al.*, 2023; Flores-Ocampo & Armstrong-Altrin, 2023; Mejía-Estrella *et al.*, 2023; Ramírez-Álvarez *et al.*, 2020). No obstante, cerca del 80 % de estos residuos plásticos se generan y liberan desde fuentes terrestres, lo que convierte al suelo en un posible reservorio a largo plazo de microplásticos (Möller *et al.*, 2020).

El suelo es una mezcla de diversos tipos de gases, líquidos, materia orgánica y minerales que pueden sustentar la vida del planeta. Este actúa como medio para múltiples servicios ecosistémicos, como los ciclos biogeoquímicos, la captura de carbono y promoción de la biodiversidad (Afrin *et al.*, 2020). Dentro de la clasificación de los suelos, el suelo urbano se distingue como una categoría particular debido a las profundas modificaciones que sufre por efecto de las actividades antropogénicas. En las zonas urbanas, la construcción de edificaciones, el desarrollo de infraestructuras, la compactación y el crecimiento poblacional alteran drásticamente las propiedades naturales del suelo (Ihenetu *et al.*, 2024; Prokof'Eva *et al.*, 2020).

Debido a su alta exposición a las actividades humanas, los suelos urbanos de las áreas metropolitanas se consideran especialmente vulnerables a la contaminación por microplásticos (Afrin *et al.*, 2020). Aunque los mecanismos aún no se comprenden completamente, diversos estudios indican que los microplásticos pueden modificar las propiedades fisicoquímicas del suelo, como la capacidad de retención de agua, la densidad aparente y la tasa de evaporación. Debido a su alta área superficial e hidrofobicidad, también pueden adsorber contaminantes tóxicos como pesticidas y metales pesados. Una vez en el ambiente, estas partículas pueden ingresar al organismo por vías dérmica, pulmonar o digestiva, provocando posibles efectos adversos como inflamación intestinal, alteraciones en la microbiota, constricción bronquial y síntomas similares al asma (Lamichhane *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2020).

Sin embargo, el verdadero alcance de esta contaminación aún es desconocido, principalmente por la ausencia de una metodología estandarizada para el muestreo y caracterización de suelos urbanos contaminados. Además, la falta de herramientas analíticas específicas dificulta la detección y correcta identificación de los microplásticos en el suelo urbano. Esta situación se ve agravada por la complejidad inherente a la matriz del suelo, así como por los retos asociados con el rastreo y análisis de un analito sólido dentro de una muestra compuesta mayoritariamente por sólidos (Möller *et al.*, 2020).

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es analizar los desafíos asociados al muestreo y la extracción de microplásticos en suelos urbanos del Área Metropolitana de Monterrey, así como proponer estrategias que optimicen tanto la recolección como el análisis en laboratorio. De esta manera, se busca no solo mejorar la precisión y comparabilidad de los datos obtenidos, sino también contribuir a una comprensión más integral y responsable del impacto de los microplásticos en los entornos urbanos.

## Materiales y Métodos

### Área de estudio

El Área Metropolitana de Monterrey (AMM) se ubica como la tercera región más poblada de México, con una población de 5,341,171 habitantes, y representa la segunda zona económica e industrial más grande del país. Este conglomerado urbano abarca una superficie de 5,346.80 km<sup>2</sup> e incluye los municipios de Apodaca, Cadereyta Jiménez, El Carmen, García, General Escobedo, Guadalupe, Juárez, Monterrey, Salinas Victoria, San Nicolás de los Garza, Santa Catarina y Santiago (Breton *et al.*, 2021; Castillo-Nava, 2024) (Figura 1).

Las condiciones climáticas y geográficas de la región hacen de la AMM un sitio estratégico para el estudio del transporte y dispersión de contaminantes, en particular microplásticos. Durante los meses de verano, el clima se caracteriza por una marcada aridez, mientras que en primavera y otoño predominan las lluvias estacionales. Esta estacionalidad, sumada a una orografía facilita la circulación de partículas y favorece el transporte de contaminantes con trayectorias y destinos difíciles de predecir (Castillo-Nava, 2024; Orta-García *et al.*, 2016).

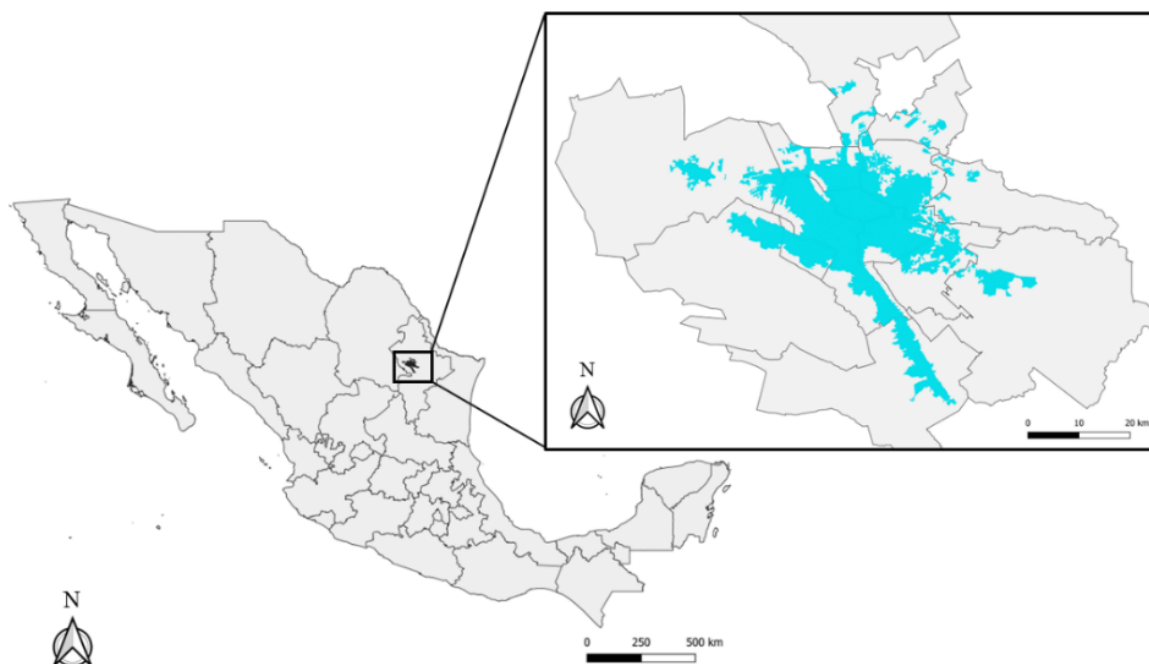


Figura 1. Mapa del Área Metropolitana de Monterrey, Nuevo León, México

En este estudio, se llevó a cabo un muestreo del suelo urbano en cuatro campus universitarios ubicados en el AMM (Monterrey Sur, Monterrey Centro, Escobedo y San Nicolás de los Garza). Estos sitios fueron seleccionados debido a su alta densidad poblacional, el intenso flujo vehicular y la diversidad de actividades que albergan, tales como las educativas, administrativas, comerciales, deportivas, entre otras.

#### *Muestreo del suelo urbano*

La toma de muestras del suelo urbano del AMM se realizó de acuerdo con la NMX-AA-132-SCFI-2016 y NOM-021-RECNAT-2000; considerando las siguientes modificaciones. Previamente, todo material utilizado para el muestreo fue lavado con agua destilada (filtrada utilizando fibra de vidrio grado GF/A) y acetona tres veces a fin de descartar cualquier presencia de contaminación por partículas plásticas que no correspondieran a los de los sitios de muestreo; por ejemplo, traslado, manipulación y contaminación ambiental del laboratorio. Así mismo, durante la preparación del material y muestreo, la vestimenta del personal del laboratorio consistió en prendas de algodón, libres de polímeros sintéticos.

Una vez delimitada el área de estudio, se tomaron muestras superficiales aleatorias (1 – 10 cm) del suelo urbano a fin de formar muestras complejas que consistieron entre cinco y ocho puntos de muestreo. Estas fueron tomadas con herramientas libres de plástico (utensilios de madera, material de aluminio o vidrio con tapa de acero inoxidable) y en sentido contrario a la dirección del viento. Además, se distribuyeron cajas Petri de vidrio con un filtro de fibra de vidrio grado GF/A, que fueron utilizados como controles atmosféricos por cada campus universitario. Finalmente, cada muestra estaba compuesta de suelo urbano de parques, pasillos, jardineras, banquetas y calles. Los muestreos fueron realizados dos semanas después de un periodo de lluvias con el fin de evitar una estimación incorrecta de la abundancia de los microplásticos presentes en el suelo urbano. Esto debido a que la presencia de agua en el suelo influye en el movimiento de las partículas, donde microplásticos con mayor densidad pueden transportarse entre las partículas del suelo, mientras que plásticos menos densos pueden flotar hacia la superficie.

#### *Extracción de microplásticos*

Las muestras del suelo urbano fueron esparcidas en recipientes de aluminio y tapadas para ser secadas en horno a 60 °C durante un periodo de tiempo de 24 a 48 h (considerando el porcentaje de humedad del día del muestreo).

Posteriormente, se cribaron las muestras secas utilizando un tamiz malla 5, para descartar todo aquello mayor a 4 mm. Nuevamente, el suelo se cribó con una malla 200 ( $>0.074$  mm) donde la fracción retenida fue almacenada en recipientes de vidrio con tapa de acero inoxidable para su posterior análisis.

A continuación, se tomaron submuestras de 2 gramos (por triplicado) para realizar la extracción de microplásticos. Para comenzar, se realizó la digestión orgánica con  $H_2O_2$  al 30% en una relación sedimento-solución de 1:3 y se dejó reposar por 72 h. En el mismo tubo de ensayo, se realizó la extracción de los microplásticos por el método de separación por densidad con una solución saturada de  $ZnCl_2$  ( $\rho = 1.5$  g/cm<sup>3</sup>), manteniendo la relación anterior. Cada tubo de ensayo se agitó durante 2 minutos y se dejó reposar durante 24 h. El sobrenadante se filtró utilizando fibra de vidrio grado GF/A. Este paso se repitió tres veces.

Finalmente, el filtro fue colocado en cajas Petri de vidrio para ser secados en el horno a 60 °C por 24 h. Los microplásticos extraídos fueron observados por microscopía óptica utilizando una cámara Leica ICC50 W incorporada en un microscopio Leica DME.

## Resultados y Discusión

En los estudios de monitoreo ambiental de contaminantes, uno de los aspectos clave es la toma de muestras en las áreas de estudio. No obstante, este paso es a menudo subestimado, lo que conduce a la recolección de muestras no representativas y, por ende, a datos poco fiables, independientemente de la precisión del procesamiento posterior (Möller *et al.*, 2020). En el caso específico de los microplásticos, aún no existe una normativa oficial ni una metodología estandarizada que proporcione directrices consistentes para el muestreo y la extracción en las distintas matrices ambientales (agua, suelo, aire y organismos). Esta ausencia de estandarización dificulta la interpretación precisa del estado actual de la contaminación por estos polímeros y limita la posibilidad de realizar comparaciones válidas entre los estudios existentes.

Por lo tanto, el presente estudio propone realizar un diseño de muestreo que consista en dos partes, dado que los microplásticos no suelen distribuirse homogéneamente, si no que suelen acumularse en zonas específicas (Möller *et al.*, 2020). En primer lugar, realizar un muestreo por juicio para identificar las zonas dentro de las áreas de muestreo (campus universitarios) con mayor actividad humana. Posteriormente, dentro de cada una de estas zonas, llevar a cabo un muestreo aleatorio simple, en el que los puntos de muestreo son seleccionados bajo el principio de que todos tendrán la misma probabilidad de ser elegidos, lo que permite garantizar una mayor fiabilidad de los datos (Möller *et al.*, 2020).

La elección de una muestra compleja se plantea principalmente por la considerable variabilidad en el tamaño de los microplásticos, lo que sugiere que su distribución en el suelo también podría variar significativamente. Para contrarrestar esta heterogeneidad, el uso de muestras complejas resulta beneficioso, ya que permite obtener una representación más precisa del alcance de la contaminación por microplásticos, sin necesidad de manipular un número elevado de muestras. Además, se ha analizado la superficie del suelo dentro de los 10 cm superficiales, ya que este es el rango donde más probablemente se encuentren la mayor parte de los microplásticos (Möller *et al.*, 2020).

Por otro lado, aún no existe un consenso claro respecto a la cantidad de muestra que debe ser recolectada por cada zona de muestreo. De hecho, la mayoría de los estudios publicados hasta la fecha omiten esta información, y en algunos casos se han reportado volúmenes de hasta 4 kg (Flores-Ocampo & Armstrong-Altrin, 2023). No obstante, en el desarrollo efectuado se sugiere que las muestras recolectadas en campo deberían ser de entre 1 - 2 kg. Esta cantidad es necesaria no solo para la cuantificación de microplásticos, sino también para la realización de análisis fisicoquímicos, tales como contenido de agua, porosidad, textura, consistencia del suelo y porcentaje de arcilla, además de permitir la conservación de una muestra de respaldo. Asimismo, debido a la naturaleza heterogénea en la distribución de microplásticos en el suelo, se considera que muestras de mayor volumen recolectadas en campo son más representativas que aquellas de menor tamaño. Estas pueden luego ser reducidas a una muestra de laboratorio más manejable mediante procesos de homogeneización.

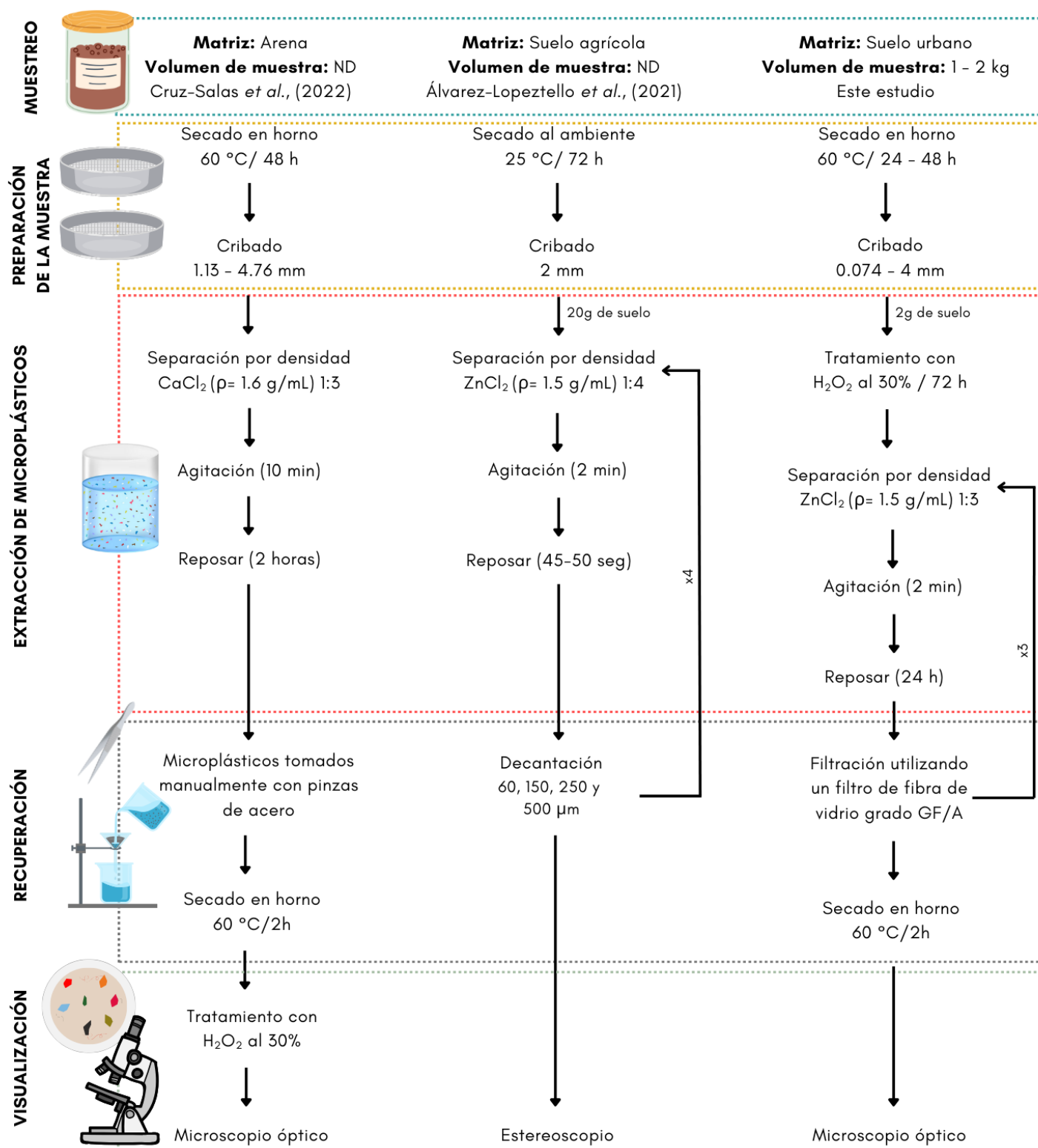


Figura 2. Representación esquematizada de las metodologías empleadas para la extracción de microplásticos en matrices como arena, suelo agrícola y suelo urbano. ND: No determinado.

Originalmente, la investigación sobre microplásticos se enfocó en ambientes acuáticos y marinos, donde su extracción se realizaba a partir de la columna de agua o de sedimentos, especialmente de la arena en las zonas costeras. Con el tiempo, surgió la necesidad de expandir estos estudios hacia los suelos, tanto agrícolas como urbanos, adaptándose las metodologías inicialmente desarrolladas para matrices acuáticas a estos nuevos entornos terrestres. Sin embargo,



trabajar con una matriz tan compleja y heterogénea como el suelo urbano y con analitos sólidos como los microplásticos, requiere ajustar tanto el diseño del muestreo como los procedimientos de extracción, de acuerdo con las particularidades de estas superficies y los objetivos específicos de cada investigación.

Para superar estas limitaciones, en la presente investigación se implementaron técnicas de extracción previamente empleadas en otras matrices, introduciendo modificaciones específicas para adecuarlas al suelo urbano. Como se observa en la Figura 2, los protocolos de separación por densidad son los más comúnmente utilizados en este tipo de estudios. Esta metodología ha demostrado ser eficaz en zonas costeras, donde los microplásticos presentan una densidad menor que las partículas de arena ( $1.65 \text{ g cm}^{-3}$ ), permitiendo su separación eficiente mediante flotación. No obstante, al aplicar esta técnica a suelos urbanos, surgen dificultades adicionales. En particular, el incremento del contenido de arcilla representa un obstáculo, ya que las partículas arcillosas tienen densidades similares ( $1.0 - 1.4 \text{ g cm}^{-3}$ ) a las de muchos plásticos ( $0.9 - 1.3 \text{ g cm}^{-3}$ ), reduciendo así la eficacia del proceso de separación. Además, el tamaño fino de estas partículas favorece la formación de agregados que pueden encapsular a los microplásticos, dificultando su aislamiento e identificación.

Frente a esta problemática, la propuesta presentada plantea un tratamiento previo con  $\text{H}_2\text{O}_2$  al 30%, aplicado durante un período de 72 h. Esta oxidación química ayuda a descomponer la materia orgánica y a liberar microplásticos atrapados en agregados arcillosos, permitiendo así una estimación más precisa de su abundancia. La utilidad de este tratamiento se refleja en los resultados obtenidos en el presente estudio, donde se identificaron morfotipos como films (Figura 3, b) y pellets (Figura 3, c), que no fueron detectados por Álvarez-Lopezello *et al.*, (2021) quienes sólo lograron aislar fragmentos y fibras empleando una metodología sin tratamiento previo.

Además, se propone extender el tiempo de reposo de las muestras a 24 h para favorecer la decantación del material arcilloso y facilitar la separación. Sin embargo, esta estrategia no siempre es suficiente. Como se muestra en la Figura 3, incluso tras este tiempo persiste la presencia de materia orgánica y partículas de suelo, lo que complica el conteo de microplásticos al microscopio y dificulta su recuperación para su caracterización química.

De forma complementaria, Cruz-Salas *et al.*, (2022) reportaron la presencia de fibras, fragmentos, films y partículas de espuma en arena. No obstante, es importante subrayar que el análisis manual mediante pinzas introduce un sesgo considerable, ya que depende exclusivamente de la observación visual, limitando así la cantidad y variedad de partículas detectadas. Por tanto, esta técnica no se considera adecuada para el análisis exhaustivo de suelos urbanos.

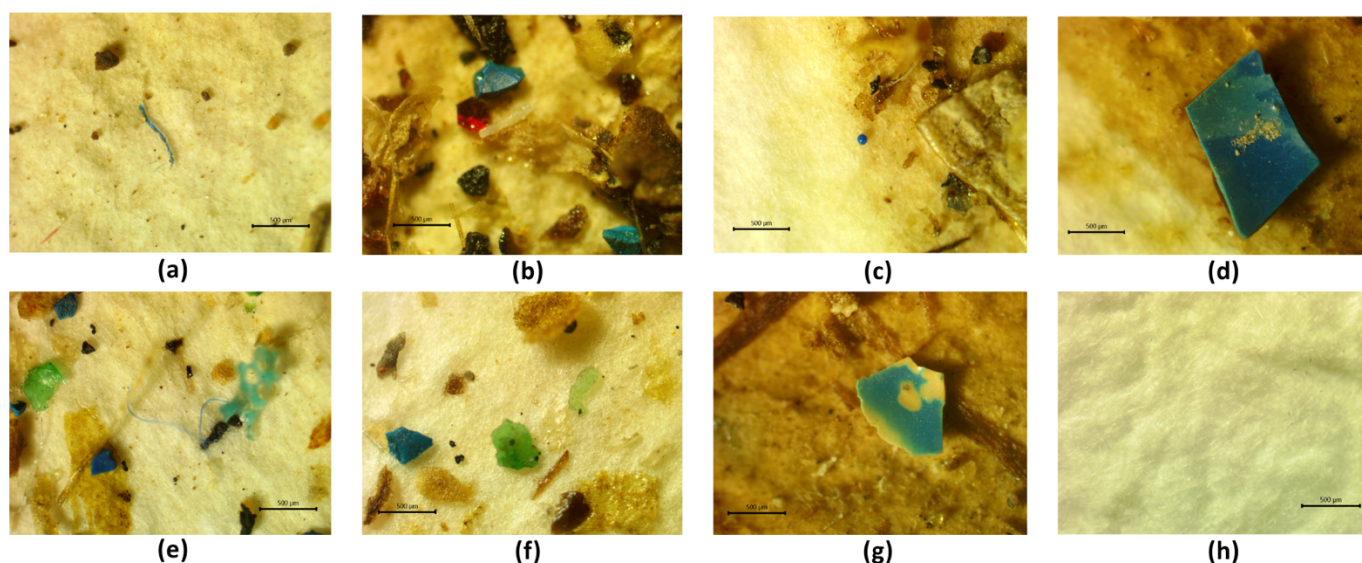


Figura 3. Microplásticos localizados en las muestras de suelo del AMM observados a 10X por microscopía óptica. La escala seleccionada fue de  $500 \mu\text{m}$ . Los morfotipos identificados fueron (a) fibras, (b, d - g) fragmentos, films y (c) pellets; (h) es el control utilizado durante el proceso de extracción.

A pesar de que las modificaciones realizadas durante el muestreo y la extracción de microplásticos facilitan la recuperación de morfotipos como fragmentos, fibras, films y pellets, es fundamental considerar algunas limitaciones de esta propuesta cuando se aplica a suelos urbanos. Durante el proceso de agitación y sedimentación, el sobrenadante que contiene los microplásticos se transfiere a un sistema de filtración, lo que puede generar pérdidas durante la decantación. Además, el uso de una solución de  $\text{ZnCl}_2$  aumenta tanto el costo de la técnica como los riesgos asociados, ya que este reactivo es corrosivo y tóxico (Möller *et al.*, 2020). Otro inconveniente es la dificultad para recuperar los microplásticos, los cuales a menudo se quedan atrapados en el filtro o se mezclan con la materia orgánica que se sedimenta durante la decantación, por lo que su verificación mediante técnicas como FTIR y Raman sigue siendo un desafío.

El uso combinado de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y  $\text{ZnCl}_2$  en el proceso de extracción de microplásticos ha demostrado ser eficaz, pero plantea varios desafíos relacionados con la sostenibilidad, la seguridad y la eficiencia general del proceso. En este sentido, se sugiere la implementación de sistemas que optimicen la recuperación y reutilización de reactivos, lo que podría reducir significativamente los residuos generados (Rodrigues *et al.*, 2020). Además, se recomienda explorar la sustitución de estos reactivos por alternativas más sostenibles, como compuestos menos tóxicos o derivados de residuos industriales. Por ejemplo, se ha evaluado el uso de aceites residuales provenientes del sector alimentario como posible sustituto del  $\text{ZnCl}_2$  debido a su capacidad potencial de facilitar la separación de los microplásticos. Sin embargo, hasta ahora se ha observado que estos aceites no alcanzan la densidad requerida para lograr una separación efectiva de la mayoría de los microplásticos. Esta alternativa, aunque prometedora, requiere de más investigación y optimización antes de poder implementarse de manera viable.

## Conclusiones

La presente investigación aporta un avance metodológico relevante para el monitoreo de microplásticos en suelos urbanos de áreas metropolitanas, al proponer por primera vez un protocolo integral adaptado a las condiciones heterogéneas de esta matriz ambiental. La implementación de un diseño de muestreo combinado y el manejo adecuado de muestras complejas permitió obtener datos más representativos sobre la distribución y el nivel de contaminación de los microplásticos en zonas urbanas. Además, la incorporación de una etapa de digestión orgánica previa a la separación por densidad facilita la remoción de partículas arcillosas, mejorando la recuperación y estimación de la abundancia de microplásticos. Si bien la metodología propuesta presenta mayores ventajas que otros métodos reportados, aún persisten limitaciones importantes, como la interferencia de materia orgánica residual en los procesos de identificación visual y caracterización química. No obstante, este trabajo sienta las bases para el desarrollo de métodos estandarizados aplicables en contextos urbanos de alta complejidad ambiental.

**Agradecimientos y financiamiento:** Los autores de este trabajo agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti), a la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León, así como al proyecto PROACTI-115-BYQ por los recursos económicos para la gestión del proyecto.

## Bibliografía

- Afrin, S., Uddin, M. K., & Rahman, M. M. (2020). Microplastics contamination in the soil from urban landfill site, Dhaka, Bangladesh. *Heliyon*, 6(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05572>
- Alvarado-Zambrano, D., Rivera-Hernández, J. R., & Green-Ruiz, C. (2023). First insight into microplastic groundwater pollution in Latin America: The case of a coastal aquifer in Northwest Mexico. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(29), 73600–73611. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27461-9>
- Álvarez-Lopezello, J., Robles, C., & del Castillo, R. F. (2021). Microplastic pollution in neotropical rainforest, savanna, pine plantations, and pasture soils in lowland areas of Oaxaca, Mexico: Preliminary results. *Ecological Indicators*, 121. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107084>
- Borges Ramírez, M. M., Dzul Caamal, R., & Rendón von Osten, J. (2019). Occurrence and seasonal distribution of microplastics and phthalates in sediments from the urban channel of the Ria and coast of Campeche, Mexico. *Science of the Total Environment*, 672, 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.472>
- Breton, R. M. C., Breton, J. C., Fuentes, M. de la L. E., Kahl, J., Guzman, A. A. E., Martínez, R. G., Guarnaccia, C., Severino, R. D. C. L., Lara, E. R., & Francavilla, A. B. (2021). Short-term associations between morbidity and air pollution in metropolitan area of Monterrey, Mexico. *Atmosphere*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/atmos12101352>
- Castillo-Nava, D. (2024). *Determinación del índice de riesgo ecológico en la zona metropolitana de Monterrey debido a metales pesados (Pb y Cd) y empleo de estrategias de biorremediación para su mitigación a través de un humedal artificial*. UANL.
- Cruz-Salas, A. A., Alvarez-Zeferino, J. C., Ojeda-Benitez, S., Cruz-Sotelo, S. E., & Vázquez-Morillas, A. (2022). Solid waste and microplastics on the beaches of Holbox Island, Mexico. *Regional Studies in Marine Science*, 53. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102423>

- Cruz-Salas, A. A., Alvarez-Zeferino, J. C., Tapia-Fuentes, J., Lobato-Rocha, S. L. D., Vázquez-Morillas, A., Ojeda-Benítez, S., & Cruz-Sotelo, S. E. (2023). Presence of microplastics in the vaquita marina protection zone in Baja California, Mexico. *Microplastics*, 2(4), 422–436. <https://doi.org/10.3390/microplastics2040031>
- Flores-Ocampo, I. Z., & Armstrong-Altrin, J. S. (2023). Abundance and composition of microplastics in Tampico beach sediments, Tamaulipas State, southern Gulf of Mexico. *Marine Pollution Bulletin*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114891>
- Ihenetu, S. C., Li, G., Mo, Y., & Jacques, K. J. (2024). Impacts of microplastics and urbanization on soil health: An urgent concern for sustainable development. In *Green Analytical Chemistry* (Vol. 8). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.greeac.2024.100095>
- Lamichhane, G., Acharya, A., Marahatha, R., Modi, B., Paudel, R., Adhikari, A., Raut, B. K., Aryal, S., & Parajuli, N. (2023). Microplastics in environment: Global concern, challenges and controlling measures. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(4), 4673–4694. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04261-1>
- Mejía-Estrella, I. A., Peña-Montes, C., Peralta-Peláez, L. A., Del Real Olvera, J., & Sulbarán-Rangel, B. (2023). Microplastics in sandy beaches of Puerto Vallarta in the pacific coast of Mexico. *Sustainability (Switzerland)*, 15(21). <https://doi.org/10.3390/su152115259>
- Möller, J. N., Löder, M. G. J., & Laforsch, C. (2020). Finding microplastics in soils: A review of analytical methods. *Environmental Science and Technology*, 54(4), 2078–2090. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04618>
- Orta-García, S. T., Ochoa-Martínez, A. C., Carrizalez-Yáñez, L., Varela-Silva, J. A., Pérez-Vázquez, F. J., Pruneda-Álvarez, L. G., Torres-Dosal, A., Guzmán-Mar, J. L., & Pérez-Maldonado, I. N. (2016). Persistent organic pollutants and heavy metal concentrations in soil from the Metropolitan Area of Monterrey, Nuevo León, Mexico. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 70(3), 452–463. <https://doi.org/10.1007/s00244-015-0239-3>
- Prokof'eva, T., Umarova, A., Bykova, G., Suslenkova, M., Ezhelev, Z., Kokoreva, A., Gasina, A., & Martynenko, I. (2020). Morphological and physical properties in diagnostics of urban soils: Case study from Moscow, Russia. *Soil Science Annual*, 71(4), 309–320. <https://doi.org/10.37501/soilsa/131598>
- Ramírez-Álvarez, N., Ríos Mendoza, L. M., Macías-Zamora, J. V., Oregel-Vázquez, L., Alvarez-Aguilar, A., Hernández-Guzmán, F. A., Sánchez-Osorio, J. L., Moore, C. J., Silva-Jiménez, H., & Navarro-Olache, L. F. (2020). Microplastics: Sources and distribution in surface waters and sediments of Todos Santos Bay, Mexico. *Science of the Total Environment*, 703. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134838>
- Rodrigues, M. O., Gonçalves, A. M. M., Gonçalves, F. J. M., & Abrantes, N. (2020). Improving cost-efficiency for MPs density separation by zinc chloride reuse. *MethodsX*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.100785>
- Wang, W., Ge, J., Yu, X., & Li, H. (2020). Environmental fate and impacts of microplastics in soil ecosystems: Progress and perspective. *Science of the Total Environment*, 708. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134841>