

Análisis cualitativo de microplásticos en partículas suspendidas en el aire de tres ciudades del estado de Guanajuato

Qualitative analysis of microplastics in airborne particulate matter from three cities in the state of Guanajuato

Ana M. Acosta Sierra¹, Inés Castañeda Sánchez¹, Juan A. Ramírez Vázquez¹, Israel Castro Ramírez^{1*}

¹Licenciatura en Ingeniería Ambiental, División Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato.
i.castro@ugto.mx

*Autor de correspondencia

Resumen

Los microplásticos, fragmentos diminutos derivados de la degradación de productos sintéticos, han sido reconocidos como contaminantes emergentes con potencial riesgo para la salud humana, debido a su persistencia en el ambiente y su compleja composición química. Estos materiales han sido detectados en diversas matrices ambientales, incluyendo su creciente presencia en el aire atmosférico, lo que plantea preocupaciones sobre su inhalación y efectos en la salud respiratoria. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la presencia de microplásticos en el aire de tres municipios del estado de Guanajuato: Irapuato, León y Salamanca. Para ello, se instalaron dos estaciones de monitoreo por municipio, ubicadas estratégicamente en zonas con alto flujo vehicular y actividad industrial, así como en áreas donde distintos grupos poblacionales realizan actividades cotidianas. Estas ubicaciones fueron seleccionadas por su relevancia en el análisis de la calidad del aire urbano. Se recolectaron un total de 25 muestras de aire utilizando filtros especializados. A partir de estas muestras, se extrajo el material particulado para su posterior análisis mediante técnicas de separación y filtración. Los resultados obtenidos revelaron la presencia de microplásticos en el 52% de las muestras analizadas, lo que indica una contaminación atmosférica significativa en las zonas evaluadas. Estos hallazgos subrayan la necesidad de continuar con estudios sistemáticos que permitan comprender mejor la distribución, fuentes y posibles impactos de los microplásticos en ambientes urbanos y en la salud pública.

Palabras clave: Microplásticos, análisis, muestras y filtros.

Introducción

Desde la llegada de los plásticos en la década de 1950, se han producido aproximadamente 10.000 millones de toneladas de residuos plásticos, de los cuales hasta la actualidad no se ha llevado un buen manejo de dichos residuos (Lee *et al.*, 2023). Los microplásticos (MPs) son partículas de plásticos menores de 5mm, comúnmente están compuestos por polietileno (PE), polipropileno, poliestireno y cloruro de polivinilo. Existen dos tipos de categorías para los microplásticos, los primarios (fabricados a medida) y secundarios (fragmentos de plásticos más grandes por procesos, físicos, químicos y biológicos) (Winijkul *et al.*, 2024; Zhai *et al.*, 2023). Se pueden presentar en una cantidad diferente de formas (fibras, fragmentos y partículas) y colores (azul, rojo, amarillo, entre otros).

Su presencia en ambientes marinos, terrestres y urbanos han llevado a que este problema se considere una amenaza para la salud humana, debido a la filtración de microplásticos en la cadena alimentaria humana en diversos alimentos y en el agua potable (Akhbarzadeh *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2025; Wu *et al.*, 2025; Zheng *et al.*, 2024). Los microplásticos pueden ingresar al organismo por inhalación e ingestión y causar daños físicos y químicos en el ser humano. (Sun *et al.*, 2024).

La atmosfera ha sido identificada como una vía emergente de transporte y exposición, tanto para el ambiente como para los seres humanos. Según Brahney *et al.* (2021), el tiempo de estancia de los microplásticos en la atmosfera, varía según su tamaño y forma va de entre 0.04 días a 6.5 días. Dichos microplásticos pueden ingresar al cuerpo humano por inhalación involuntaria o respiración y permanecer en los pulmones.

El presente estudio tiene como objetivo identificar la presencia de microplásticos en filtros obtenidos de diferentes estaciones de monitoreo en tres ciudades del estado de Guanajuato: Irapuato, León y Salamanca.

Materiales y Métodos

Zona de Estudio

El muestreo se llevó a cabo en el estado de Guanajuato, México, con el objetivo principal de analizar la presencia de microplásticos en distintos municipios: Irapuato, León y Salamanca. En cada uno de estos municipios se seleccionaron sitios estratégicos, ubicados en zonas con alto flujo vehicular y actividad industrial, así como en áreas donde diversos grupos poblacionales realizan actividades cotidianas (TABLA 1). Estas ubicaciones fueron elegidas por su relevancia en el estudio de la calidad del aire urbano, ya que representan entornos con condiciones propicias para la acumulación de contaminantes atmosféricos, incluyendo microplásticos.

Tabla 1. Descripción ubicación de las estaciones de monitoreo

Ciudad	Salamanca	León	Irapuato
Estación	DIF (DIF)	CRUZ ROJA (CR)	SABES Centro Jacinto López
Ubicación	Calle Rosario Castellanos No. 103, Col. Guanajuato, C.P. 36780	Avenida Faja de Oro Esq. Con Ezequiel Ordoñez, Col. Bellavista, C.P. 36730	Calle Manuel Crescencio Rejón No. 209, Colonia Periodistas Mexicanos, C.P. 37433
Coordenadas	latitud: 20°33'29.55"	latitud: 20°34'43.63"	latitud: 21° 5' 36.11"
	longitud: 101°12'17.44"	longitud: 101°11'56.19"	longitud: 101° 44' 43.73"

Los municipios de León, Irapuato y Salamanca con ubicación en el estado de Guanajuato representan zonas urbanas de gran importancia con diferentes características geográficas, climatológicas e industriales. León con una población aproximada de 1.58 millones de habitantes y una altitud de 1,798 m.s.n.m, se caracteriza por su clima templado y su gran actividad manufacturera, destacando por ser una de las ciudades más grandes del estado. Irapuato se encuentra a una altitud de 1,724 m.s.n.m y con una población menor con un registro de 592,953 de personas en 2020, se distingue por su importancia en el sector agroindustrial, donde destaca la producción de fresas, hortalizas y autopartes, su clima predominante es templado subhúmedo. Salamanca con una altitud de 1,721 m.s.n.m y una población muy por debajo de las 2 ciudades anteriores, con 143,549 habitantes (INEGI, 2020), representa un centro de energía estratégico por la presencia de una refinería de PEMEX y una planta termoeléctrica.

El incremento de la actividad industrial y el crecimiento urbano en estas tres ciudades ha despertado preocupaciones ambientales, especialmente por la calidad del aire. Las autoridades a nivel estatal y federal han instalado redes de monitoreo atmosférico para registrar la presencia de contaminantes como el ozono (O₃), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), etc. Este tipo de monitoreos permiten la obtención de datos para estudios ambientales y de salud, que sirven para la implementación de prácticas sustentables que respondan ante los retos ecológicos que presentan estas ciudades.

Diseño del muestreo y metodología de recolección

Para el desarrollo de este proyecto se contempló la instalación de seis estaciones de monitoreo atmosférico, distribuidas en tres municipios del estado de Guanajuato: Irapuato, León y Salamanca, con dos estaciones por localidad. Las estaciones fueron ubicadas en puntos estratégicos dentro de cada zona de estudio, considerando criterios como el alto flujo vehicular, la actividad industrial y la presencia de población realizando actividades cotidianas. Estas ubicaciones fueron seleccionadas por su relevancia en el análisis de la calidad del aire urbano, al representar entornos con condiciones propicias para la acumulación y dispersión de contaminantes atmosféricos, incluyendo microplásticos.

Adicionalmente, se instaló una estación meteorológica con el propósito de registrar las condiciones climáticas locales, tales como humedad relativa, temperatura, radiación solar, velocidad y dirección del viento, entre otros parámetros. Esta información fue fundamental para evaluar la dinámica de dispersión de partículas en el área de estudio y su zona de influencia, mediante el análisis de rosas de viento y otros indicadores atmosféricos.

En total, se recolectaron 40 muestras de aire en los distintos sitios de muestreo. Algunas de estas muestras se realizaron por triplicado con el fin de garantizar la confiabilidad y reproducibilidad de los resultados. Asimismo, se incluyeron muestras blancas para detectar posibles contaminaciones cruzadas durante el proceso de muestreo y análisis.

El procedimiento de muestreo se basó en el método de referencia de alto volumen descrito en el apartado 6 de la NOM-035-SEMARNAT-1993, el cual permite medir la concentración de partículas suspendidas totales (PST) en el aire ambiente. Este método emplea un muestreador adecuadamente localizado que succiona aire a través de un filtro, durante un periodo de 24 horas, hacia el interior de una caseta o coraza de protección.

Para la recolección de muestras se utilizaron muestreadores de alto volumen marca TISCH ENVIRONMENT®, con un flujo promedio de 38–42 ft³/min y cabezal para partículas PM₁₀. Los filtros empleados fueron de fibra de cuarzo (SiO₂) de 8" x 10" marca Whatman™, los cuales fueron acondicionados antes y después del muestreo conforme al apartado 8.9 de la NOM-035-SEMARNAT-1993. Este proceso incluyó la exposición controlada a condiciones específicas de temperatura y humedad, con el objetivo de eliminar impurezas y humedad residual, seguido de un pesaje para determinar la ganancia neta de masa.

La preparación de los filtros inició en el laboratorio, donde se colocaron en sus respectivos porta-filtros bajo condiciones controladas, utilizando guantes, cubrebocas y bata, y evitando corrientes de aire para prevenir cualquier tipo de contaminación. Posteriormente, los filtros fueron trasladados a las estaciones de monitoreo para su instalación.

Una vez en campo, se procedió a realizar la toma de muestra siguiendo las indicaciones del apartado 9 de la NOM-035-SEMARNAT-1993, que detalla la correcta manipulación del equipo, la instalación de los porta-filtros y los parámetros que deben registrarse en la bitácora técnica.

El almacenamiento de las muestras consistió en envolver los filtros en papel aluminio, asegurando que la cara expuesta al flujo de aire quedara protegida para evitar la pérdida de material particulado. Luego, se colocaron en carpetas, introducidas en sobres y finalmente en bolsas con cierre hermético, con el fin de minimizar el riesgo de alteraciones por exposición a calor, humedad o corrientes de aire, preservando así sus características originales para el análisis posterior.

Análisis de Muestras

Para la evaluación de microplásticos en material particulado atmosférico, se seleccionaron 25 filtros recolectados en distintas estaciones de monitoreo, además de tres filtros blancos utilizados como controles de calidad. Cada filtro fue seccionado en una novena parte para su procesamiento, a fin de optimizar el análisis sin comprometer la representatividad de la muestra.

Los fragmentos fueron colocados en vasos de precipitado de 80 mL y sumergidos en 20 mL de agua desionizada, previamente filtrada mediante membranas de celulosa con porosidad de 0.45 µm (Whatman®). Posteriormente, las muestras fueron sometidas a un proceso de sonicación a 20 kHz durante 5 minutos utilizando un procesador ultrasónico Cole-Parmer® de 750 watts, con el objetivo de desprender las partículas adheridas a la superficie del filtro.

Tras la sonicación, los filtros fueron enjuagados cuidadosamente con agua grado HPLC (JT Baker®) para maximizar la recuperación de partículas en suspensión. Una vez retirados los filtros, las muestras líquidas fueron secadas en un horno de convección forzada a 60 °C (FELISA®), asegurando la completa evaporación del solvente sin degradar los posibles microplásticos presentes.

Para la eliminación de materia orgánica, las partículas secas fueron tratadas con 25 mL de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) al 30 % (Merck®, Alemania), también previamente filtrado con membranas de 0.45 µm. Las muestras fueron nuevamente colocadas en el horno a 60 °C durante aproximadamente 48 horas, permitiendo una digestión oxidativa controlada.

Una vez completado este proceso, se añadieron 20 mL de etanol grado HPLC (JT Baker®), también filtrado, a cada vaso con las muestras secas. Tras una ligera agitación manual, las soluciones fueron filtradas utilizando membranas de politetrafluoroetileno (PTFE) Whatman® con porosidad de 0.22 µm. Los filtros resultantes fueron examinados bajo un estereoscopio Zeiss®, permitiendo la identificación visual de partículas sospechosas de ser microplásticos. Las observaciones fueron documentadas fotográficamente, y cada filtro fue cuidadosamente envuelto en papel aluminio para su conservación, evitando pérdidas o contaminación posterior.

Parámetros de Calidad y Control de Contaminación

Durante todo el procedimiento analítico se implementaron rigurosas medidas de control de calidad para minimizar el riesgo de contaminación cruzada o ambiental. Las muestras fueron manipuladas exclusivamente en un espacio cerrado, con puertas y ventanas selladas, y acceso restringido al personal, con el fin de limitar el movimiento de aire y la deposición de partículas externas.

Las superficies de trabajo consistieron en mesas de aluminio previamente limpiadas con etanol al 70 % (prefiltrado). Adicionalmente, se colocó una capa de papel aluminio sobre la superficie, también limpiada con etanol, para reforzar la limpieza del área de trabajo. Todo el material de laboratorio reutilizable fue lavado con una solución de hexano-acetona (1:1, JT Baker®) para eliminar residuos orgánicos y garantizar condiciones estériles.

Durante el análisis, se utilizó equipo de protección personal (EPP) en todo momento, incluyendo bata de laboratorio, cubrebocas y guantes de nitrilo, los cuales fueron cambiados con frecuencia para evitar la transferencia de contaminantes. Asimismo, todas las sustancias empleadas —agua desionizada (H₂O), peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y etanol (C₂H₆O)— fueron filtradas antes de su uso mediante un sistema de filtración previamente lavado entre cada aplicación. Este paso fue esencial para remover partículas potenciales presentes en los reactivos y minimizar el riesgo de contaminación externa.

Resultados y Discusión

Se recolectaron un total de 40 muestras de aire en seis estaciones de monitoreo distribuidas en tres municipios del estado de Guanajuato: León, Irapuato y Salamanca. Sin embargo, para el presente estudio se seleccionaron 25 filtros con características adecuadas para el análisis, basándose en la masa de material particulado recolectado. La masa promedio obtenida en estos filtros fue de 16.725 ±0.376 mg, correspondiente a la fracción de partículas con diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros (PM₁₀), según lo establecido en la NOM-035-SEMARNAT-1993.

La selección de cinco muestras por ciudad tuvo como propósito obtener una representación espacial equilibrada de cada zona urbana, considerando la variabilidad ambiental y las condiciones locales de emisión de contaminantes. De las 25 muestras analizadas, 13 filtros presentaron evidencia de partículas de microplásticos, lo que representa aproximadamente un 52 % del total. Estas partículas fueron detectadas tanto en muestras individuales como en triplicados, lo que refuerza la confiabilidad de los resultados.

Las muestras positivas provinieron de las siguientes estaciones de monitoreo:

- León: Estación SABES
- Irapuato: Estación Bomberos
- Salamanca: Estaciones DIF y Cruz Roja

Por otro lado, 14 muestras no mostraron presencia de microplásticos, lo que corresponde al 48 % restante. Estas muestras también incluyeron tanto individuales como triplicadas. Las estaciones asociadas a resultados negativos fueron:

- León: Escuela Primaria Miguel Hidalgo
- Irapuato: Escuela Primaria Profa. Teódula Fuerte Orozco
- Filtros blancos: Utilizados como controles para descartar contaminación cruzada durante el proceso de muestreo y análisis

Interpretación de Resultados

La distribución de microplásticos en las muestras analizadas sugiere una presencia heterogénea de estos contaminantes emergentes en el ambiente urbano. La detección en estaciones como SABES y Cruz Roja, donde se recolectaron triplicados positivos, indica una posible persistencia de microplásticos en esas zonas, posiblemente asociada a actividades humanas intensivas, tráfico vehicular y condiciones meteorológicas locales.

La ausencia de microplásticos en otras estaciones, como Primaria Miguel Hidalgo y Teódula Fuerte Orozco, podría estar relacionada con factores como la ubicación geográfica, la vegetación circundante, la menor densidad poblacional o condiciones climáticas específicas durante el periodo de muestreo (Shruti et al., 2022).

Estos resultados destacan la importancia de considerar tanto la variabilidad espacial como la temporal en estudios de calidad del aire, especialmente cuando se evalúan contaminantes emergentes como los microplásticos. Además, refuerzan la necesidad de realizar estudios complementarios que incluyan análisis químicos y morfológicos para caracterizar con mayor precisión el tipo de polímero presente y sus posibles fuentes.

Los sitios con mayor número de muestras positivas fueron las estaciones SABES (León) y Cruz Roja (Salamanca), en ambos casos con triplicados contaminados, lo que indica una alta consistencia en la detección de microplásticos en esas ubicaciones. Esta recurrencia sugiere una fuente persistente de emisión o acumulación de partículas plásticas en dichas zonas.

Caracterización Morfológica de Microplásticos

La Figura 1 presenta imágenes representativas obtenidas mediante estereoscopía (Zeiss®), donde se observan partículas con morfología fibrosa. Estas estructuras son indicativas de microplásticos secundarios, es decir, fragmentos derivados de la degradación de objetos plásticos más grandes. Las fibras observadas podrían estar compuestas por polímeros sintéticos como poliéster o nailon, materiales comúnmente utilizados en textiles, empaques y productos industriales (Lee, 2020).

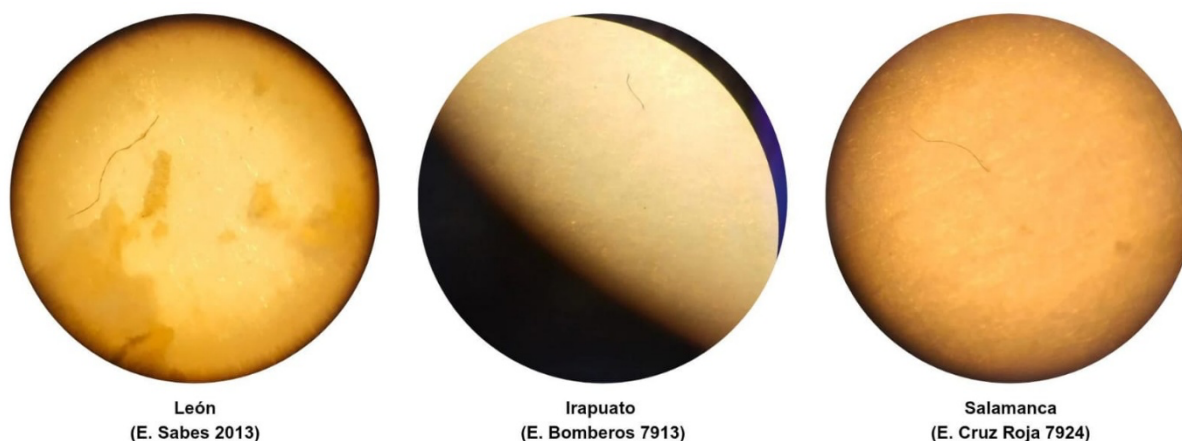


Figura 1. Imágenes representativas del estereoscopio muestran microplásticos en forma de fibras.

Estudios previos, como el realizado en la ciudad de Seúl, han reportado que los microplásticos de tipo fibra representan hasta el 90 % de las partículas sintéticas presentes en el aire urbano, lo que coincide con los hallazgos de este estudio (Jahanzaib *et al.*, 2025).

Variabilidad Espacio-Temporal en la Presencia de Microplásticos

Se observó que, en varias estaciones de muestreo, se obtuvieron tanto resultados positivos como negativos en cuanto a la presencia de microplásticos. Esta variabilidad puede atribuirse a factores ambientales y temporales, como las condiciones meteorológicas al momento de la recolección. El estudio abarcó tanto la temporada seca como la de lluvias, lo que pudo influir en la concentración de partículas suspendidas.

La precipitación, por ejemplo, actúa como un mecanismo natural de limpieza atmosférica, reduciendo la carga de partículas en el aire. Otros factores como la temperatura, la velocidad y dirección del viento, y las actividades humanas (tráfico, industria, construcción) también pueden afectar significativamente la dispersión y acumulación de microplásticos en el ambiente (Anandavelu *et al.*, 2024; Roy *et al.*, 2024; Wu *et al.*, 2025).

Las estaciones de muestreo se ubicaron en zonas urbanas con alta densidad poblacional y tráfico vehicular constante. Estas condiciones favorecen la liberación de contaminantes al ambiente, incluyendo microplásticos que pueden permanecer suspendidos en el aire o depositarse en el polvo atmosférico. La contaminación del polvo es una vía importante de exposición humana a contaminantes ambientales, como lo señala la USEPA (2011).

Dado que muchas de las estaciones se encuentran cercanas a escuelas y centros de salud, se recomienda ampliar futuros estudios en estas áreas para evaluar con mayor profundidad los posibles efectos de los microplásticos atmosféricos sobre la salud humana, especialmente en poblaciones vulnerables como niños y adultos mayores.

Evaluación de la Fiabilidad del Estudio

Para asegurar la reproducibilidad y confiabilidad de los resultados, se implementó un diseño experimental que incluyó triplicados por estación, seleccionando un noveno de cada filtro. Se analizaron un total de 9 muestras triplicadas correspondientes a las tres ciudades, además de 2 triplicados de filtros blancos (6 muestras en total).

Los resultados mostraron que:

- En la estación Bomberos (Irapuato), ninguno de los tres filtros del triplicado presentó microplásticos.
- En la estación SABES (León), los tres filtros del triplicado resultaron positivos.
- En la estación Cruz Roja (Salamanca), los tres filtros también mostraron presencia de microplásticos.

Estos hallazgos refuerzan la consistencia de los resultados y la validez del método empleado, ya que los triplicados positivos confirman la presencia real de microplásticos en las zonas evaluadas, y no se trata de hallazgos aleatorios o errores de procedimiento.

Control de Contaminación y Blancos Analíticos

El análisis de filtros blancos fue fundamental para descartar contaminación cruzada durante las etapas de preparación, transporte, almacenamiento y procesamiento en laboratorio. Se implementaron medidas estrictas de control, incluyendo: 1) Uso de guantes estériles con cambio frecuente. 2) Trabajo en un espacio cerrado con flujo de aire controlado. 3) Empleo exclusivo de materiales limpios y esterilizados.

Como resultado, las 6 muestras blancas estuvieron completamente libres de microplásticos, lo que indica una mínima interferencia ambiental o de laboratorio. Además, se realizaron pruebas adicionales dejando filtros abiertos durante la inspección visual, sin detectar microplásticos, lo que confirma que la contaminación del entorno de laboratorio fue insignificante.

Conclusión

El presente estudio logró cumplir con el objetivo de identificar la presencia de partículas de microplásticos en el aire atmosférico de tres ciudades representativas del estado de Guanajuato: Irapuato, León y Salamanca. A través del análisis de 25 muestras, se detectó la presencia de microplásticos en 13 de ellas, lo que representa 52% del total. Este hallazgo evidencia una preocupante contaminación atmosférica por estos contaminantes emergentes, cuya persistencia en el ambiente urbano plantea riesgos potenciales para la salud humana y el ecosistema.

Estos resultados se alinean con estudios previos que indican que las fibras sintéticas, como el poliéster y el nailon, son los tipos de microplásticos más prevalentes en ambientes urbanos. Por ejemplo, investigaciones realizadas en la ciudad de Seúl han reportado que las fibras representan hasta el 90 % de los microplásticos detectados en el aire. Dado que muchas de las estaciones de muestreo se encuentran cercanas a escuelas y centros de salud, se recomienda ampliar futuros estudios en estas zonas para evaluar con mayor profundidad los posibles efectos de los microplásticos atmosféricos sobre la salud humana, especialmente en poblaciones vulnerables como niños y adultos mayores.

Bibliografía/Referencias

- Akbarzadeh, R., Dobaradaran, S., Amouei Torkmahalleh, M., Saeedi, R., Aibaghi, R., & Faraji Ghasemi, F. (2021). Suspended fine particulate matter (PM_{2.5}), microplastics (MPs), and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in air: Their possible relationships and health implications. *Environmental Research*, 192. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110339>
- Anandavelu, I., Karthik, R., Robin, R. S., Hariharan, G., Mugilarasan, M., Ramesh, R., & Purvaja, R. (2024). Morphometric characteristics and spatiotemporal heterogeneity of microplastics on the north-east coast of India. *Journal of Hazardous Materials*, 480. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136180>
- Gautam, B. P. S., Qureshi, A., Gwasikoti, A., Kumar, V., & Gondwal, M. (2024). Global Scenario of Plastic Production, Consumption, and Waste Generation and Their Impacts on Environment and Human Health. In: Soni, R., Debbarma, P., Suyal, D. C., Goel, R. (eds) *Advanced Strategies for Biodegradation of Plastic Polymers*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-55661-6_1
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Censo Nacional de Población y Vivienda 2020. Tabulados básicos. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- Jahanzaib, M., Sharma, S., & Park, D. (2025). Microplastics comparison of indoor and outdoor air and ventilation rate effect in outskirts of the Seoul metropolitan city. *Emerging Contaminants*, 11(1). <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100408>
- Lee, Y., Cho, J., Sohn, J., & Kim, C. (2023). Health Effects of Microplastic Exposures: Current Issues and Perspectives in South Korea. *Yonsei Med J.*, 64(5), 301-308. doi: 10.3349/ymj.2023.0048. PMID: 37114632; PMCID: PMC10151227.
- Roy, D., Kim, J., Lee, M., Kim, S., & Park, J. (2024). PM₁₀-bound microplastics and trace metals: A public health insight from the Korean subway and indoor environments. *Journal of Hazardous Materials*, 477. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135156>
- Ruiz-Santoyo, V., Cruz-Mérida, J., García Carvajal, S., & Arenas Arrocena, M. C. (2025). Microplásticos y nanoplásticos: una amenaza para la salud humana y el medio ambiente. *Mundo Nano*, 18(34), e69832. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://www.scielo.org.mx/pdf/mn/v18n34/2448-5691-mn-18-34-e69832.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2020). Diagnóstico sobre la problemática de los residuos plásticos en México. Gobierno de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554129/Diagnostico_sobre_la_problematika_de_lo_s_residuos_plasticos_en_Mexico.pdf
- Shruti, V. C., Kutralam-Muniasamy, G., Pérez-Guevara, F., Roy, P. D., & Martínez, I. E. (2022). Occurrence and characteristics of atmospheric microplastics in Mexico City. *Science of the Total Environment*, 847. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157601>
- Sun, J., Yang, J., Ho, S. S. H., Peng, Z., Niu, X., Qu, L., Lui, K. H., Guo, H., & Ho, K. F. (2024). Characterization and toxicological effects of microplastics in PM_{2.5} in background sites of the southern coast of China. *Atmospheric Environment*, 337. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120779>

- Wang, R., Bulati, A., Zhan, L., & Xu, Z. (2025). Complicated pollution characteristics (particulate matter, heavy metals, microplastics, VOCs) of spent lithium-ion battery recycling at an industrial level. *Science of the Total Environment*, 962. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178406>
- Winijkul, E., Latt, K. Z., Limsiriwong, K., Pussayanavin, T., & Prapasongsas, T. (2024). Depositions of airborne microplastics during the wet and dry seasons in Pathum Thani, Thailand. *Atmospheric Pollution Research*, 15(10). <https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102242>
- Wu, C. H., Dang, T. T. M., Mutuku, J. K., Lin, L. M., Huang, B. W., & Chang-Chien, G. P. (2025). Evaluation of PM2.5 bound microplastics and plastic additives in several cities in Taiwan: Spatial distribution and human health risk. *Science of the Total Environment*, 959. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178213>
- Zhai, X., Zheng, H., Xu, Y., Zhao, R., Wang, W., & Guo, H. (2023). Characterization and quantification of microplastics in indoor environments. *Heliyon*, 9(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15901>
- Zheng, H., Guo, H., Fu, H., & Yao, K. (2024). Microplastics in indoor and outdoor environments in China: Characteristic and human exposure risk assessment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 287. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117328>