

Contenido

- 3 Carta Editorial**
-
- artículos**
-
- 5 Latinoamérica frente al plástico: ¿vamos bien o vamos tarde?**
Arely Anaya Hernández, Vanessa Pérez Ilhuicatzí
- 10 Transformación del plástico PET de desecho en productos de alto valor agregado a través de métodos químicos**
Ana Ybeth Flores Angeles, Ricardo Solís Rodríguez
- 15 Del residuo al recurso: el PET reciclado como base para nuevos materiales**
Miriam Paola Barrera Nava y Antonio Martínez Richa
- 21 Perspectiva actual de los plásticos y el ácido poliláctico (PLA) como alternativa sostenible**
Humberto Cruz Ramírez, Miriam Paola Barrera Nava, Antonio Martínez Richa
- 27 Insectos al rescate de un mundo lleno de plástico**
Kevin Ramírez Dávila, Mónica Aidée Ortiz Márquez, Juana Elizabeth Reyes Martínez, Patricia Nayeli Alva Murillo, Juan Pablo Huchin Mian
- 32 Microplásticos en la agricultura: consecuencias para la salud del suelo y la seguridad de los alimentos cultivados**
María Elena López Pérez, Sarai Camarena Martínez, Servando Reyes Castro, Graciela M.L. Ruiz Aguilar
- 37 Uso de herramientas de fabricación digital para reducir la contaminación por plásticos**
Antonio Arias, Jesús Méndez, María Ortega, Alan Arias, Antonio Horta, Norma Gutiérrez, Alma Serafín
- 41 ¿Puede la inteligencia artificial ayudarnos a combatir el plástico en los océanos?**
Eduardo Sánchez-Ramírez, Brenda Huerta-Rosas, Maricruz Juarez-García, Juan Gabriel Segovia-Hernández



Carta Editorial

En el presente año 2025 la Organización de las Naciones Unidas, en específico el día 5 de junio celebró el Día Mundial de Medio Ambiente en donde se orientó un enfoque especial hacia un tema específico:

“Poner fin a la contaminación por plásticos”,
con el lema
“Desafío Compartido, Acción Colectiva”.

La edición número 33 de la revista NaturaLEEza, integra diversos trabajos de miembros de la comunidad universitaria, quienes comparten sus conocimientos y experiencias académicas y de trabajo en equipo, en trabajos de investigación y divulgación para la internalización de valores para la sustentabilidad, asociados a la conservación de nuestros ecosistemas y a las buenas prácticas ambientales universitarias.

De acuerdo con datos de la propia agencia internacional comentada, y publicados en el sitio <https://www.un.org/es/observances/environment-day>:

“Cada año se producen a nivel mundial más de 400 millones de toneladas de plástico y se cree que la mitad de este material se concibe para una vida útil de un solo uso.

Menos del 10% se recicla. Se estima que 11 millones de toneladas de desechos plásticos terminan cada año en lagos, ríos y mares. Eso equivale al peso de alrededor de 1,089 Torres Eiffel juntas.”

Por lo anterior, toma importancia el conjunto de trabajos editados para esta publicación asociados a la contaminación por plásticos.

Es Importante recordar que el Proyecto de Desarrollo Institucional para la Universidad de Guanajuato 2023-2027 de la Dra. Claudia Susana Gómez López orienta a tener una visión sustentable y amigable con el medio ambiente, fortaleciendo la conciencia de la comunidad con un enfoque de corresponsabilidad, bajo la integración de la Agenda Ambiental UG.

Es así que como parte de esta agenda de difusión la Revista Naturaleeza, presenta diversos trabajos, acorde con las secciones que se comparten en este número y que, por la temática de este año, también están asociados con el Objetivo 12 (Consumo Responsable) de los 17 Objetivos para el Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030. **Dado el profundo interés que ha despertado en nuestra comunidad, se presenta en esta ocasión en 2 volúmenes.**

El **volumen I**, se compone de artículos específicos relativos al tema de la convocatoria, en donde se presentan un sólido paquete de 8 contribuciones de profesores investigadores universitarios y de estudiantes de distintos programas educativos, que reflejan la riqueza multidisciplinaria de nuestra institución en los cuatro campus universitarios.

Entre las temáticas abordadas, se pueden comentar alternativas para el manejo sostenible del plástico de desecho como material para la remoción de contaminantes, el uso de herramientas digitales para reducir la contaminación por plásticos, así como el uso de PET reciclado como base para nuevos materiales.

Destacan también algunos artículos con análisis asociados con la posibilidad de usar insectos “*al rescate de un mundo lleno de plásticos*”, así como destacadas colaboraciones que reflexionan sobre los micro plásticos en la agricultura y sobre como la inteligencia artificial puede ser una herramienta para reducir la contaminación por plásticos. Lo anterior pone en relieve los muy diversos temas de análisis, investigaciones y acciones referentes al enfoque especial que ha orientado los contenidos de este número 33.

El **volumen II**, integra las secciones tradicionales de esta publicación universitaria, que se refieren a continuación:

En la sección “**VIVE SUSTENTABLE**”, se presenta un artículo interesante y profundo sobre la posibilidad y necesidad de crear bioplásticos a través de la biología sintética.

De igual manera en esta sección se publica un trabajo acorde a la sección denominado “La naturaleza como elemento fundamental del diseño interior lúdico”.

Por otro lado, y en continuidad de los contenidos del volumen II, en el apartado de “**GRUPOS EN ACCIÓN**”, se presentan una colaboración que da cuenta de algunas acciones de los estudiantes universitarios, en actividades de campo como parte de sus trabajos de investigación, denominado “Entre la fe, la pólvora y plástico: La paradoja de la Santa Cruz”.

Asimismo, en al apartado denominado, “**MI CONTRIBUCIÓN A LA AGENDA 2030**”, se publica una destacada nota de las actividades del Museo de Historia Natural Alfredo Dugés.

En complemento en la sección “**ARTÍCULOS**” se integran 3 colaboraciones, que contemplan el análisis sobre la posibilidad del manejo de residuos orgánicos para la producción de biocombustibles, así como alternativas sustentables para el reciclado plástico y un importante artículo asociado a las consecuencias ambientales del cultivo del agave azul en Guanajuato.

Por último, en “**EVENTOS RECENTES**” se presenta una breve síntesis de las actividades de la comunidad universitaria en el desarrollo de la Agenda Ambiental UG.

Les invitamos a leer esta edición y compartir el presente número, en su versión impresa.

Dra. Graciela Ma. de la Luz Ruiz Aguilar
Directora Editorial de la Revista NaturaLEEza

Latinoamérica frente al plástico: ¿vamos bien o vamos tarde?

Arely Anaya Hernández¹, Vanessa Pérez Ilhuicatzi¹

¹Laboratorio de Toxicología y Química Ambiental
/ Centro de Investigación en Genética y Ambiente
/ Universidad Autónoma de Tlaxcala

Introducción

La contaminación plástica representa una de las crisis ambientales más complejas del siglo XXI. Desde la invención del plástico sintético a inicios del siglo pasado, su producción ha crecido de manera exponencial que, de acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), ha alcanzado más de 400 millones de toneladas al año (PNUMA, 2021). Este material, resistente, versátil y barato, ha invadido prácticamente todos los aspectos de la vida moderna, pero su durabilidad es también su mayor problema: gran parte del plástico producido persiste durante siglos en el ambiente, fragmentándose en partículas cada vez más pequeñas (micro y nanoplasticos) que contaminan ecosistemas y organismos vivos, incluyendo al ser humano.

Latinoamérica, como región biodiversa, con múltiples realidades socioeconómicas y un rol importante en el comercio global de materias primas, se encuentra en una posición estratégica. La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) reporta que la producción de plásticos en la región alcanza los 20 millones de toneladas anuales, representando el 5% de la producción mundial (430 millones de toneladas) (CEPAL, 2022). La mayor producción se encuentra en Brasil (48%) y México (29%), seguido por Argentina (10%), Colombia (8%) y Venezuela (5%); mientras que el consumo supera los 26 millones de toneladas anuales: 40 kilos por habitante. De acuerdo con datos del PNUMA, publicados en el portal de Naciones Unidas (<https://news.un.org/es/story/2022/06/1509892>), se generan diariamente 17,000 toneladas de residuos plásticos, de los cuales el 30% aún se dispone en basureros a cielo abierto, afectando a más de 40 millones de personas. El PNUMA también reporta que en 2020 los países de América Latina y el Caribe contribuyeron con 3.7 millones de toneladas de contaminación plástica en los océanos (PNUMA, 2021) (Figura 1).

En respuesta a esta crisis mundial, la comunidad internacional ha impulsado acciones para mitigar la contaminación plástica, enmarcadas dentro del Objetivo de Desarrollo



Figura 1. Contaminación plástica en los cuerpos de agua. Foto de <https://pixabay.com>

Sostenible 12: Producción y consumo responsables, de la Agenda 2030 de Naciones Unidas (ONU, 2015; como se puede leer en la página <https://globalgoals.org/goals/12-responsible-consumption-and-production/>). Pero ¿cuánto hemos avanzado con este compromiso en Latinoamérica? ¿Vamos en buen camino o aún estamos a tiempo de corregir el rumbo?

Avances legislativos: una región en movimiento contra el plástico

Durante la última década, varios países latinoamericanos han adoptado prohibiciones y restricciones sobre productos plásticos de un solo uso. Por ejemplo, en 2017, Antigua y Barbuda se convirtió en el primer país de la región en prohibir las bolsas de plástico de un solo uso, publicándolo en su Gaceta Oficial Vol. XXXVII No. 89 (Gobierno de Antigua y Barbuda, 2017). En 2018, el Gobierno de Guatemala publicó el Acuerdo Gubernativo No. 189-2019 prohibiendo el uso y la distribución de bolsas de plástico de un solo uso y recipientes desechables de plástico o poliestireno expandido (popotes, platos y vasos) en todo el país (https://elaw.org/resource/gt_plasticlaws). En ese mismo año, el Ministerio del Medio Ambiente de Chile prohibió por ley las bolsas plásticas en el comercio (Ley N° 21100; <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1121380>), y en 2021 amplió su marco legal para regular la entrega de plásticos de un solo uso y las botellas plásticas (Ley N° 21368; <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1163603>).

En Brasil, la ciudad de São Paulo publicó, en 2019 en su Diario Oficial, el Decreto N° 61.558 que prohíbe la distribución y uso de popotes plásticos en establecimientos comerciales (<https://prefeitura.sp.gov.br/w/noticia/canudos-plasticos-estao-proibidos-em-estabelecimentos-comerciais-na-cidade>). Además, Brasil desarrolló el Plan Nacional 2023-2025 que lucha contra la basura plástica en el mar proveniente de las actividades marítimas y la pesca (<https://glolitter.imo.org/resources/brazil>). También en 2019, Costa Rica publicó la Ley N° 9786 para combatir la contaminación por plástico y proteger el ambiente, prohibiendo la venta y distribución de popotes y bolsas plásticas en comercios; y prohibiendo a las administraciones públicas comprar artículos de plástico de un solo uso (https://elaw.org/resource/cr_plasticlaws). En Argentina, la Ley 27602 de 2020 prohíbe que los productos cosméticos y de higiene oral de uso odontológico contengan microperlas de plástico (<https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-27602-345720/texto>). En 2020, Ecuador también se sumó a reducir la contaminación plástica publicando la Ley para la Racionalización, Reutilización y Reducción de Plásticos de Un Solo Uso, la cual obliga a los negocios a eliminar gradualmente los popotes de plásticos y optar por alternativas biodegradables o reutilizables; además de obligar a las empresas a aumentar gradualmente el porcentaje de materiales reciclados en sus envases de plástico, del 5% al 30% (The Cuenca Dispatch, 2025). Por su parte, El Gobierno de Colombia aprobó en 2022 la Ley 2232, que establece un cronograma para eliminar paulatinamente ciertos plásticos de un solo uso hasta 2030 (<https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Leyes/30044415>); siendo en 2024 que el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible emitió la Resolución 0803 que permite la implementación de esta Ley (<https://www.mnambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-0803-del-24-de-junio-de-2024/>).

En México, el Senado de la República aprobó en 2021 una reforma a la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos, que buscaba regular los plásticos de un solo uso. Sin embargo, hasta 2024 la iniciativa seguía pendiente de aprobación en la Cámara de Diputados (Sistema de Información Legislativa, 2025). En 2022, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en conjunto con el PNUMA, desarrollaron el Plan de

Acción Nacional sobre Residuos Marinos y Contaminación por Plásticos (PLAN REMAR) y un inventario Nacional de Fuentes de Contaminación Plástica (IN-FCP) (SEMARNAT, 2023). Hasta 2023, 29 de las 32 entidades federativas mexicanas habían aprobado leyes que restringen o prohíben ciertos plásticos de un solo uso, sin embargo, la implementación es desigual y muchas de estas normativas carecen de reglamentos claros, sanciones efectivas o infraestructura adecuada para su cumplimiento (Reyes-Jaime y cols., 2024).

Además de las normativas de cada país, Colombia, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua y Panamá trabajaron conjuntamente para desarrollar el Plan de Acción sobre Basura Marina para el Pacífico Nordeste 2022-2026 (<https://marviva.net/wp-content/uploads/2022/06/Plan-de-Accion-de-Basura-Marina-2022-2026.pdf>), que recomienda acciones para prevenir, reducir y gestionar los residuos de manera adecuada.

Los límites de la prohibición: ¿basta con eliminar las bolsas?

En América Latina, la gestión de residuos plásticos es uno de los mayores desafíos estructurales. Según la CEPAL, menos del 10% de los residuos plásticos en la región se reciclan, y una gran proporción termina en rellenos sanitarios, basureros a cielo abierto, cuerpos de agua o simplemente en el entorno. Además, muchas ciudades carecen de sistemas de separación, recolección diferenciada o plantas de reciclaje con capacidad real para manejar plásticos complejos o contaminados. Esto se agrava por la precarización del trabajo de los recicladores informales, quienes son responsables de gran parte de la recuperación de materiales reciclables, pero no reciben reconocimiento ni condiciones laborales dignas (CEPAL, 2022).

Aunque la regulación del uso de plásticos de un solo uso y la gestión de los residuos plásticos son medidas positivas y necesarias, centrarse únicamente en productos visibles como bolsas, popotes o utensilios desechables es insuficiente. La mayor parte de la contaminación plástica no es visible a simple vista, pues el plástico se fragmenta en partículas microscópicas

llamadas micro y nanoplasticos que persisten en el ambiente y se bioacumulan en los organismos acuáticos y terrestres, incluyendo el humano (Figura 2). Diversos estudios han demostrado la presencia de micro y nanoplasticos en prácticamente todos los ecosistemas (Sequeira y cols., 2020; Lamichhane y cols., 2023; Umeh y cols., 2024). Una revisión bibliográfica hecha por Orona-Návar y cols., sobre microplásticos en América Latina y el Caribe encuentra reportes de microplásticos en aguas superficiales y sedimentos de ríos, lagos, estuarios y mares de la región, así como en diversos organismos acuáticos (Orona-Návar y cols., 2022). Los micro y nanoplasticos están presentes incluso en tejidos y fluidos humanos (Thompson y cols., 2024), como sangre (Leslie y cols., 2022), placenta (Ragusa y cols., 2021), leche materna (Liu y cols., 2023) y semen (Zhao y cols., 2023).

En México, investigaciones han detectado microplásticos en el aire (Shruti y cols., 2022), ríos (Shruti y cols., 2019), lagos (Jiménez-Contreras y cols., 2024), costas (Flores-Cortés y Armstrong-Altrin, 2022; Rendón-von Osten y cols., 2023), aguas pluviales (Piñón-Colin y cols., 2019) y especies acuáticas destinadas al consumo humano (Kutralam-Muniasamy y cols., 2023). La exposición crónica a estas partículas puede generar efectos adversos en la salud,

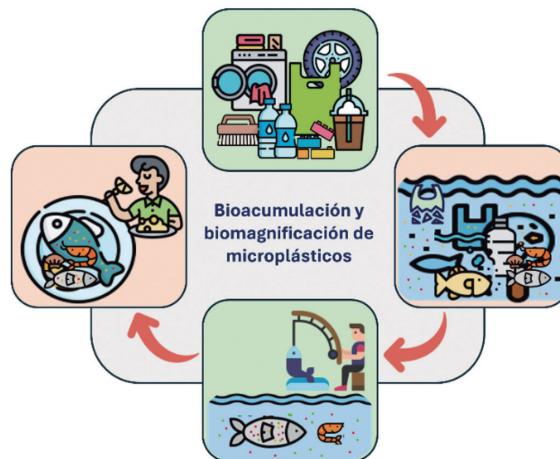


Figura 2. Bioacumulación y biomagnificación de microplásticos a través de la cadena alimenticia. Imagen elaborada con ayuda de Flaticon. <https://www.flaticon.es/>

desde inflamación y estrés oxidativo hasta posibles disrupciones hormonales y efectos genotóxicos, aunque aún se requieren más estudios para establecer causalidades claras (Thompson y cols., 2024).

En este contexto, la contaminación plástica se ha transformado en un problema de salud pública y justicia ambiental, que afecta de manera desproporcionada a comunidades vulnerables, especialmente aquellas cercanas a sitios de disposición final, ríos contaminados o instalaciones industriales (Figura 3).

¿Qué más se necesita para un cambio estructural?

A pesar de los avances normativos, Latinoamérica enfrenta múltiples retos estructurales y culturales:

- Falta de conciliación legal: cada país y estado legisla por separado, lo que complica la cooperación regional y el comercio de productos sostenibles.



Figura 3. Niño expuesto a la contaminación plástica. Foto de <https://pixabay.com>

- Deficiencias en infraestructura: muchas ciudades aún carecen de sistemas integrales para la recolección, reciclaje y valorización de residuos.
- Falta de educación ambiental: las campañas de sensibilización aún son esporádicas, poco masivas o no contextualizadas culturalmente.
- Desigualdad social: los impactos de la contaminación afectan más a poblaciones empobrecidas, que además dependen del plástico para necesidades básicas.
- Desinformación sobre alternativas: no todos los productos "biodegradables" o "compostables" son realmente sostenibles en condiciones reales.

CONCLUSIONES

Latinoamérica ha mostrado voluntad política para combatir la contaminación plástica, pero aún no alcanza el ritmo ni la profundidad necesarias para cumplir con el ODS 12. Las prohibiciones de productos de un solo uso son solo un primer paso. Se requiere una transformación sistémica, basada en el rediseño de productos, la promoción de economías circulares, el fortalecimiento institucional y una ciudadanía crítica e informada.

México y otros países de la región tienen el potencial de liderar este cambio si logran articular sus esfuerzos legislativos con ciencia, participación ciudadana y justicia ambiental. Estamos a tiempo, pero debemos actuar ya.

REFERENCIAS

- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2022). *La economía circular en América Latina y el Caribe: Una visión compartida*. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/5fceda72-3fed-4ace-bb87-5688547cf2f5/content>
- Flores-Cortés, M., & Armstrong-Altrin, J. S. (2022). Textural characteristics and abundance of microplastics in Tecolutla beach sediments, Gulf of Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(10), 752. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10447-4>

- Gobierno de Antigua y Barbuda. (2017). *The External Trade (Shopping Plastic Bags Prohibition) Order, 2017 (Statutory Instrument No. 83)*. <https://laws.gov.ag/wp-content/uploads/2019/03/No.-83-The-External-Trade-Shopping-Plastic-Bags-Prohibition-Order-2017.pdf>
- Jiménez-Contreras, J., Fernández-Medina, R. I., & Fernández-Araiza, M. A. (2024). Microplastics pollution in tropical lakes: Water, zooplankton, and fish in Central Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(9), 813. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12978-4>
- Kutralam-Muniasamy, G., Shruti, V. C., Pérez-Guevara, F., Roy, P. D., & Martínez, I. E. (2023). Consumption of commercially sold dried fish snack "Charales" contaminated with microplastics in Mexico. *Environmental Pollution*, 332, 121961. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121961>
- 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>
- Leslie, H. A., van Velzen, M. J. M., Brandsma, S. H., Vethaak, A. D., Garcia-Vallejo, J. J., & Lamoree, M. H. (2022). Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*, 163, 107199. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107199>
- Liu, S., Guo, J., Liu, X., Yang, R., Wang, H., Sun, Y., Chen, B., & Dong, R. (2023). Detection of various microplastics in placentas, meconium, infant feces, breastmilk and infant formula: A pilot prospective study. *Science of the Total Environment*, 854, 158699. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158699>
- Orona-Návar, C., García-Morales, R., Loge, F. J., Mahlknecht, J., Aguilar-Hernández, I., & Ornelas-Soto, N. (2022). Microplastics in Latin America and the Caribbean: A review on current status and perspectives. *Journal of Environmental Management*, 309, 114698. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114698>
- Piñón-Colin, T. J., Rodriguez-Jimenez, R., Rogel-Hernández, E., Alvarez-Andrade, A., & Wakida, F. T. (2020). Microplastics in stormwater runoff in a semiarid region, Tijuana, Mexico. *Science of the Total Environment*, 704, 135411. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135411>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2021). *From pollution to solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution*. <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution>
- Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, V., Carnevali, O., Papa, F., Rongioletti, M. C. A., Baiocco, F., Draghi, S., D'Amore, E., Rinaldo, D., Matta, M., & Giorgini, E. (2021). Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International*, 146, 106274. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>
- Rendón-von Osten, J. R., Benítez-Torres, J. A., Rojas-González, R. I., Morgado, F., & Borges-Ramírez, M. M. (2023). Microplastics in sediments from the southern Gulf of Mexico: Abundance, distribution, composition, and adhered pollutants. *Science of the Total Environment*, 873, 162290. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162290>
- Reyes-Jaime, A., Aguilar-Ibarra, A., Anglés-Hernández, M., & Güereca-Hernández, L. P. (2024). Legislaciones estatales para los plásticos de un solo uso en México: ¿Qué sectores están incluidos? *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 40(1), 105–117. <https://doi.org/10.20937/RICA.54930>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2023). *Inventario Nacional de fuentes de contaminación plástica*. https://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/2023/NFCP_2023.pdf
- Sequeira, I. F., Prata, J. C., da Costa, J. P., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. (2020). Worldwide contamination of fish with microplastics: A brief global overview. *Marine Pollution Bulletin*, 160, 111681. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111681>
- Shruti, V. C., Jonathan, M. P., Rodriguez-Espinosa, P. F., & Rodríguez-González, F. (2019). Microplastics in freshwater sediments of Atoyac River basin, Puebla City, Mexico. *Science of the Total Environment*, 654, 154–163. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.054>
- 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, 157601. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157601>
- Sistema de Información Legislativa de la Secretaría de Gobernación. (2025). *Iniciativa que reforma y adiciona diversas disposiciones de las leyes General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. https://sil.gobernacion.gob.mx/Archivos/Documentos/2025/04/asun_4896518_20250430_1746052911.pdf
- The Cuenca Dispatch. (2025). Ecuador moves to ban single-use plastic straws amid environmental push. <https://thecuencadispatch.com/ecuador-moves-to-ban-single-use-plastic-straws-amid-environmental-push/>
- Thompson, R. C., Courtene-Jones, W., Boucher, J., Pahl, S., Raubenheimer, K., & Koelmans, A. A. (2024). Twenty years of microplastic pollution research—What have we learned? *Science*, 386(6720), eadl2746. <https://doi.org/10.1126/science.adl2746>
- Zhao, Q., Zhu, L., Weng, J., Jin, Z., Cao, Y., Jiang, H., & Zhang, Z. (2023). Detection and characterization of microplastics in the human testis and semen. *Science of the Total Environment*, 877, 162713. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162713>

artículos

Transformación del plástico PET de desecho en productos de alto valor agregado a través de métodos químicos

Ana Ybeth Flores Angeles¹, Ricardo Solís Rodríguez¹

¹Departamento de Ingeniería de Minas, Metalurgia y Geología | División de Ingenierías | Campus Guanajuato | Universidad de Guanajuato

INTRODUCCIÓN

En los últimos años algunos autores han señalado que los residuos plásticos representan una amenaza al medio ambiente y los seres vivos. La generación de plásticos se incrementa año con año debido al crecimiento de la población y a la falta de infraestructura para su reciclado. Los autores Ahmed et al. (2025) estiman que la producción anual de plástico en el mundo superará los 34 mil millones de toneladas para el año 2050. Es importante señalar que el plástico está presente en la vida cotidiana del siglo XXI (ver Figura 1).

Por ejemplo, con el plástico se fabrican productos tecnológicos (laptops, celulares, tabletas, teclados, periféricos, etc.), se envasan bebidas o se envuelven alimentos. Su uso se debe principalmente a sus características fisicoquímicas, como: baja densidad, resistencia química, flexibilidad, resistencia mecánica, entre otras (Wang et al., 2024). De acuerdo con algunos autores, solamente el 16 % de los residuos plásticos se recicla y el resto se acumula en los ecosistemas y, debido a su lenta velocidad de degradación, su acumulación representa un problema grave (Geyer et al., 2017). Entre los principales tipos de plásticos presentes en los rellenos sanitarios se encuentra el polímero termoplástico de alta densidad (PEAD), el polietileno de baja densidad (PEBD), el cloruro de polivinilo (PVC), el poliestireno (PS), el polipropileno (PP) y el tereftalato de polietileno (PET) (Geyer et al., 2017; Vázquez-Morillas et al., 2023).

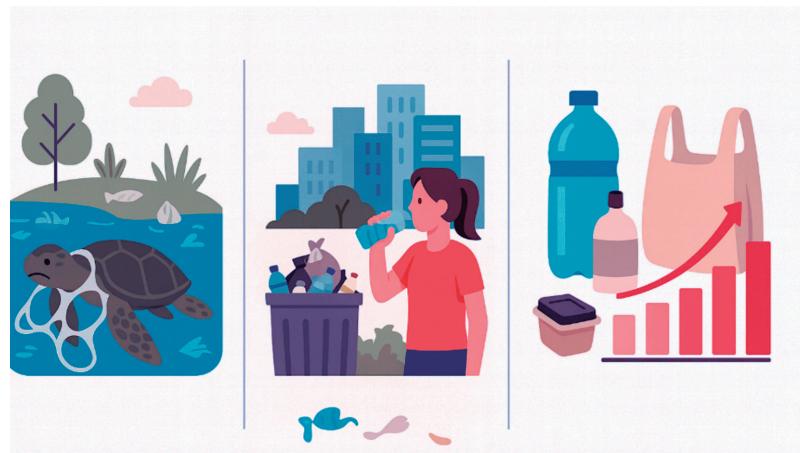


Figura 1. Fuentes de generación de plásticos y su impacto en el medio ambiente (Recurso IA <https://chatgpt.com/>).

El plástico PET es utilizado a menudo para la fabricación de botellas que son empleadas como envases para bebidas carbonatadas y agua. Se estima una producción de 30 millones de toneladas de este tipo de plástico en el mundo para el año 2030 (Ahmed et al., 2025). En México, los autores Vázquez-Morillas et al. (2024) estiman un consumo promedio de plástico per cápita de 66 Kg/persona/año, además, mencionan que los principales plásticos que se encuentran contaminando el medioambiente son el PP, PET y PS. Esta cifra es alarmante, considerando que hace 50 años aproximadamente el consumo per cápita de cada mexicano era de 4.5 Kg/persona/año, es decir, un hubo un incremento del 1466.6% en tan solo cinco décadas (Vázquez-Morillas et al., 2024). Otros autores indican que este incremento se ha originado por la mala gestión de los residuos plásticos en el país. Por ejemplo, se estima que el 17 % de los municipios carecen de servicios de recolección, y solo el 2% tienen sitios adecuados de disposición final de desechos (Vázquez-Morillas et al., 2023). Asimismo, en México existe una falta de infraestructura, financiamiento, capacidad técnica e incentivos para la gestión y manejo adecuado de los residuos plásticos. En el estado de Guanajuato, de acuerdo con cifras reportadas por la secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial (SMOAT, 2018), las industrias con mayor generación de plásticos de desecho son la agricultura y la manufactura, con un porcentaje de reciclaje del 17.33% y 10.85%, respectivamente.

Cabe mencionar que aproximadamente un 15% de los residuos de manejo especial (RME) a nivel estatal son manejados por el sector informal (pepene y empresas no registradas en la SMOAT).

En recientes investigaciones se ha puesto como tema de interés el reciclaje eficiente del plástico PET a través de la transformación de estos residuos en productos de alto valor y calidad. Este trabajo se enfoca en presentar las principales rutas para la conversión del PET en materiales de valor agregado y su posible aplicación.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años se han publicado trabajos de investigación enfocados a la búsqueda de métodos económicos para la conversión de desechos PET en materiales para la construcción, fabricación de subproductos y adsorbentes. Esto no solamente es una alternativa para iniciar la ruta hacia su mitigación en el medio ambiente, también es una posibilidad de dar un valor agregado a este tipo de desechos. Finalmente, esta ruta de revalorización permitiría disminuir en gran medida los problemas relacionados con el manejo inadecuado del plástico PET y la contaminación del agua (Joseph et al., 2024).

DEGRADACIÓN QUÍMICA DEL PET

El plástico PET es un material compuesto por polímeros sintéticos, su estructura molecular está constituida por cadenas de etilenglicol (EG) y ácido tereftálico (TPA) formando enlaces tipo éster (enlace covalente que une un grupo ácido con un grupo alcohol). Actualmente se han descrito diferentes métodos químicos para la degradación del PET. Como se observa en la Figura 2, las principales vías son hidrólisis, alcohólisis, pirólisis y aminólisis (Guo et al., 2025). A continuación, se describen brevemente cada una de ellas:

La alcohólisis consiste en utilizar disolventes, comúnmente alcoholes como el metanol o el isoctanolo. Al estar en contacto con el PET producen su despolimerización formando componentes dimetilo (DMT) y etilenglicol (EG) que se convierten en monómeros de tereftalato de bis(hidroxietilo) (BHET). Este proceso se lleva a cabo a temperaturas superiores a los 160 °C con una tasa de conversión del 97 % (Scremin et al., 2019).

La hidrólisis, considerado hasta el momento el método más eficiente de degradación PET, consiste en utilizar diferentes reactivos químicos en solución para favorecer la ruptura de los enlaces PET para formar nuevos subproductos. En la hidrólisis los productos generados son el etilenglicol (EG) y ácido tereftálico (TPA), monómeros básicos del PET. Es importante señalar que, según el reactivo utilizado, la hidrólisis se clasifica en ácida (ácido sulfúrico) y alcalina (hi-

dróxido de sodio o de potasio) (Cao et al., 2022). La degradación química del PET también puede lograrse mediante pirólisis, es decir, usando alta temperaturas y bajo una atmósfera con un gas inerte (principalmente de nitrógeno), el PET se despolimeriza en productos combustibles valiosos como alcanos, naftenos, aromáticos, etc., y otros subproductos como bióxido de carbono, monóxido de carbono o metano. Además, el aceite de pirólisis consta de múltiples componentes, como derivados del benceno, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), hidrocarburos lineales y ácidos (Guo et al., 2025).

Finalmente, los estudios de la aminólisis del PET son limitados en la literatura. Sin embargo, el método consiste en despolimerizar al PET empleando etanolamina como disolvente produciendo un ácido bis(2-hidroxietileno) tereftálico (BHETA).

APLICACIÓN DEL PET DE DESCHO PARA EL TRATAMIENTO DE METALES PESADOS

En los últimos años se ha reportado en la literatura diferentes métodos de conversión del PET de desecho en adsorbentes para el tratamiento de metales pesados (ver Figura 3). Utilizando nano fibras de PET con titanio, los autores Martins et al. (2023) lograron remover aproximadamente el 80% de plomo (Pb) contenido en solución sintética con una concentración inicial de 20 mg/L de Pb y un tiempo de contacto PET-contaminante de 120 min. También, estos autores evaluaron la capacidad de adsorción

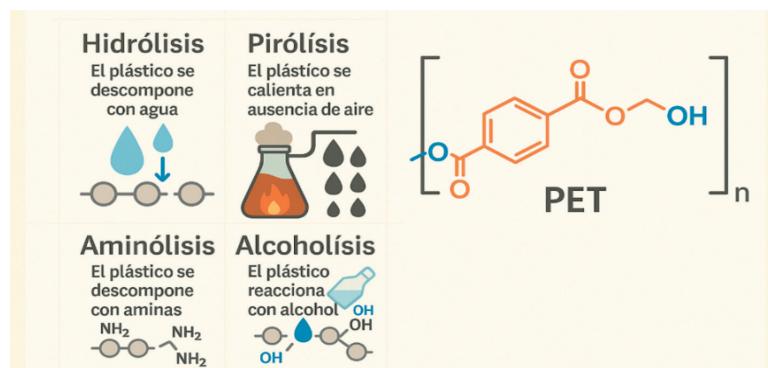


Figura 2. Métodos químicos para la degradación del plástico PET (Recurso IA <https://chatgpt.com/>).

del PET modificado en un rango de pH de 2.0 a 6.0, incrementándose de 9.69 mg/g a 34.46 mg/g conforme se incrementó el pH. Otros autores, preparando un adsorbente a base de PET carbonizado utilizando un método simple de disociación térmica (600 °C durante 100 min), lograron remover el 72%, 35%, 64% y 32% de iones Cd (II), Pb (II), Cu (II) y Zinc (II), respectivamente, en un tiempo de contacto de 180 min a un pH de 7.0 (Chakraborty et al., 2024). Ungureanu et al. (2020) transformaron al PET en un adsorbente granular utilizando para su modificación compuestos fenólicos (**fenol**, p-clorofenol e **hydroquinona**) para la remoción de Cu (II) de soluciones acuosas, alcanzando una capacidad de remoción de 177.90 mg/g a un pH de 6.5 y un tiempo de contacto de 24 h.

Es evidente que uso del PET como adsorbente es una alternativa prometedora para el tratamiento de aguas contaminadas, principalmente de los efluentes minero-metalúrgicos. Sin embargo, aún es necesario desarrollar nuevos métodos, más económicos y respetuosos con el medio ambiente para su implementación a escala industrial.

CONCLUSIÓN

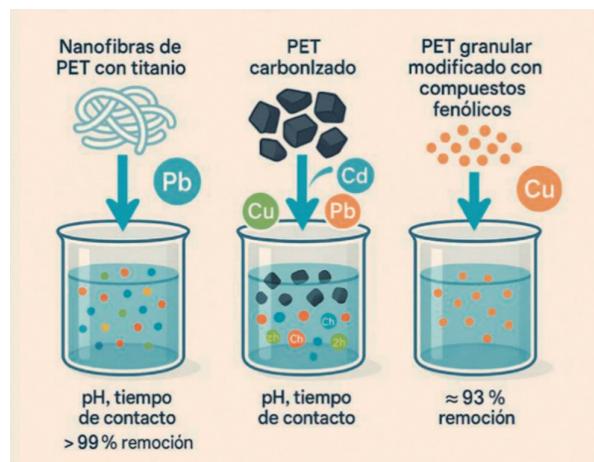


Figura 3. Aplicación de adsorbentes PET para el tratamiento de metales pesados. (Recurso IA <https://chatgpt.com/>).

El PET es un material ampliamente utilizado hoy en día en México y en el mundo. Sin embargo, a pesar de su utilidad y sus propiedades físicas y químicas, genera una gran cantidad de desechos plásticos que son difíciles de reciclar. La transformación química del PET ofrece una alternativa para producir subproductos valiosos, como monómeros BHET, TPA, DMT y EG. La hidrólisis es considerada el método más sencillo y se realiza en un medio ácido o base. La aminólisis, aunque poco estudiada, es otro método prometedor de reciclaje químico, que utiliza etanolamina como disolvente para producir BHETA. La pirólisis es un proceso de degradación que se lleva a cabo a altas temperaturas, transformando al PET en moléculas más simples de TPA y EG.

Si bien se han descrito y aplicado varios métodos químicos para la conversión del PET en materiales valiosos, incluyendo adsorbentes para la remoción de algunos metales pesados (Pb, Cu, Zn, Cd), es necesario desarrollar a futuro procesos que operen a bajas temperaturas, bajo consumo energético, económicos y altamente eficientes para convertir completamente el PET en materiales adsorbentes y en productos químicos con valor agregado.

REFERENCIAS

- Ahmed, A. A., Alyami, M., AlArjani, A., Bafaqeer, A., Owolabi, T. O., Salami, T., Al-Absi, Z. A., Ghanem, A. S., Salah, A., & Qahwan, T. F. (2025). Recent progress on recycling and upcycling of PET plastic waste into high-value-added materials for versatile applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(3). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116678>
- Cao, F., Cao, F., Wang, L., Wang, L., Zheng, R., Zheng, R., Guo, L., Guo, L., Chen, Y., Chen, Y., Qian, X., & Qian, X. (2022). Research and progress of chemical depolymerization of waste PET and high-value application of its depolymerization products. *RSC Advances*, 12(49). <https://doi.org/10.1039/D2RA06499E>
- Chakraborty, T. K., Rahman, M. S., Islam, K. R., Nice, M. S., Netema, B. N., Zaman, S., Ghosh, G. C., Rayhan, M. A., Khan, M. J. H., Munna, A., Haque, M. M., Bosu, H., Hossain, N., Halder, M.,

- Khan, A. S., Chakraborty, T. K., Rahman, M. S., Islam, K. R., Nice, M. S.,...Khan, A. S. (2024). Application of machine learning and statistical approaches for optimization of heavy metals (Cd^{2+} , Pb^{2+} , Cu^{2+} , and Zn^{2+}) adsorption onto carbonized char prepared from PET plastic bottle waste. *AQUA-Water Infrastructure Ecosystems and Society*, 73(6). <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.222>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Guo, Z., Guo, Z., Wu, J., Wu, J., Wang, J., & Wang, J. (2025). Chemical degradation and recycling of polyethylene terephthalate (PET): a review. *RSC Sustainability*, 3(5). <https://doi.org/10.1039/D4SU00658E>
- Joseph, T. M., Azat, S., Ahmadi, Z., Jazani, O. M., Esmaeili, A., Kianfar, E., Haponiuk, J., & Thomas, S. (2024). Polyethylene terephthalate (PET) recycling: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100673>
- Martins, T. R., Santos, A. G. d., Bertuol, D. A., Aguiar, M. L., & Tanabe, E. H. (2023). Novel recycled PET/tannin nanofibers for effective removal of lead(II) from water. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2023.100894>
- Scremin, D. M., Miyazaki, D. Y., Lunelli, C. E., Silva, S. A., & Zawadzki, S. F. (2019). PET Recycling by Alcoholysis Using a New Heterogeneous Catalyst: Study and its Use in Polyurethane Adhesives Preparation. *Macromolecular Symposia*, 383(1). <https://doi.org/10.1002/masy.201800027>
- Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial (SMAOT). (2018). *Diagnóstico Estatal de Generación y Composición de Residuos de Manejo Especial 2018*. Gobierno del Estado de Guanajuato.
- Ungureanu, O. I., Bulgariu, D., Mocanu, A. M., Bulgariu, L., Ungureanu, O. I., Bulgariu, D., Mocanu, A. M., & Bulgariu, L. (2020). Functionalized PET Waste Based Low-Cost Adsorbents for Adsorptive Removal of Cu(II) Ions from Aqueous Media. *Water 2020*, Vol. 12, Page 2624, 12(9). <https://doi.org/10.3390/w12092624>
- Vázquez-Morillas, A., Alvarez-Zeferino, J. C., Cruz-Salas, A. A., Martínez-Salvador, C., Tapia-Fuentes, J., Araiza, J. P. H.-L., Beltrán-Villavicencio, M., Espinosa-Valdemar, R. M., Rosillo-Pantoja, I., & Velasco-Pérez, M. (2024). Inventories of plastic pollution sources, flows and hotspots as a baseline for national action plans: The experience of Mexico. *Science of The Total Environment*, 957. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177338>
- Vázquez-Morillas, A., Salvador, C. M., Fuentes, J. T., Salas, A. A. C., Zeferino, J. C. Á., Araiza, J. P. H. L., & Pérez, M. V. (2023). Inventario nacional de fuentes de contaminación plástica: el caso de México. Actas del X Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos: Hacia la circularidad y el residuo cero. Castelló de la Plana, 20, 21 y 22 de junio de 2023
- Wang, C.-Y., Chu, H.-Y., & Wang, C.-C. (2024). Converting waste PET plastics to high value-added MOFs-based functional materials: A state of the art review. *Coordination Chemistry Reviews*, 518. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.216106>

Del residuo al recurso: el PET reciclado como base para nuevos materiales

Miriam Paola Barrera Nava¹ y Antonio Martínez Richa¹

¹Posgrado en Química / División de Ciencias Naturales y Exactas / Campus Guanajuato / Universidad de Guanajuato

INTRODUCCIÓN

¿Qué pasaría si pudiéramos tomar una botella de plástico (que tarda más de 400 años en degradarse) y darle una segunda vida en otro material con aplicaciones más detalladas?

Actualmente el plástico se ha convertido en un material de uso cotidiano, ya que nos ofrece flexibilidad y comodidad en varias partes, desde casa, escuela hasta industria. Al emplear diariamente este tipo de materiales plásticos, aumentamos la demanda y por tanto la generación de residuos, por lo que es necesario implementar métodos que sean sostenibles para gestionar estos residuos.^[1] Esto podría ir en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, al promover producción sostenible, reducción de contaminación y gestión eficiente de residuos y la transformación de procesos lineales a procesos circulares.

El polietileno tereftalato o tereftalato de polietileno (PET) es un polímero (un tipo de plástico) resistente, accesible y ligero, utilizado en una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo recipientes para alimentos y bebidas, textiles y otros productos como bolsas, películas y fibras.^[2] La producción mundial de PET en 2023 fue de 25.6 millones de toneladas (Mt),^[3] en México se consumió el 3.3% de esta producción global. México ocupa el primer lugar de América en el acopio y reciclaje de envases de PET,^[4] con una tasa de acopio de 64% (Figura 1).

El PET puede reciclarse mediante dos procesos principales; el reciclaje mecánico, un proceso físico que comprende fundir y moldear para transformar los desechos en materia prima. El reciclaje químico consiste en descomponer el PET para obtener moléculas más sencillas que permitan transformar estos residuos en materia

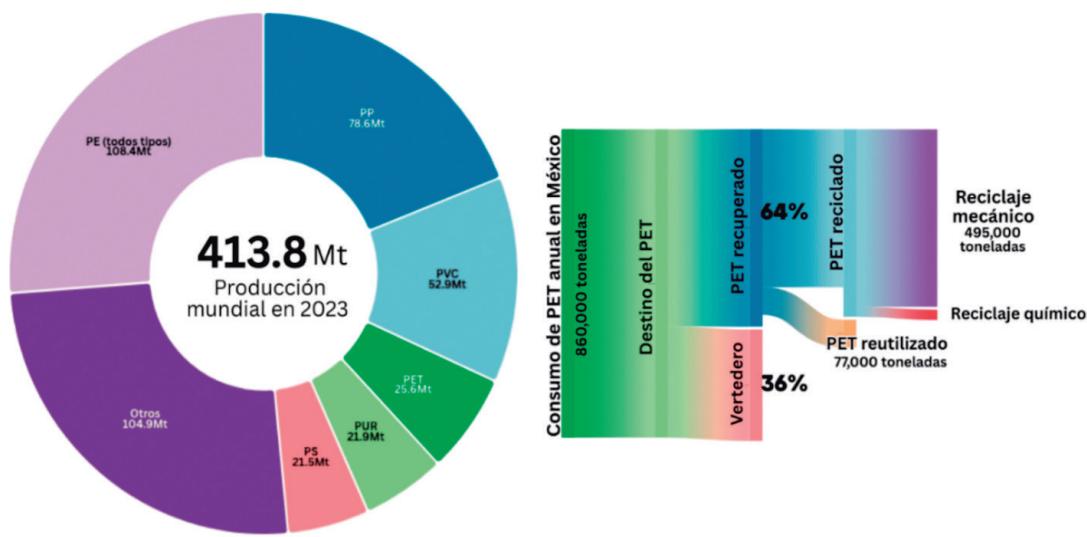


Figura 1. Producción mundial de plásticos y consumo de PET en México en 2023, basado en datos de Plastics Europe y ECOCE.^[2,3]

prima versátil y de mejor calidad para la fabricación de nuevos productos. El reciclaje químico del PET en México constituyó aproximadamente el 3% del consumo anual de PET en México durante el 2023.^[4]

Los residuos de PET pueden aprovecharse en el sector de poliuretanos (otro tipo de polímeros) mediante la obtención de polioles a partir del PET. Estos polioles se pueden conseguir mediante la despolimerización del PET (reciclaje químico del PET), un proceso que implica la reacción del PET con dióleos. Estos polioles poseen una estructura lineal y se emplean en la fabricación de espumas de poliuretano, las cuales pueden ser flexibles o rígidas, así como en la producción de recubrimientos y adhesivos, y en conjunto con otros materiales pueden ser más amigables con el medio ambiente^[5] ya que por sí solo los polioles no son materiales biodegradables. Desarrollar, evaluar y mejorar rutas químicas para la degradación del PET es paso importante para transformar los residuos de un plástico tan utilizado y darle una segunda vida. Este trabajo hace una comparación entre tres métodos reportados de degradación química del PET, analizando su eficiencia, condiciones de reacción y peso molecular de los polioles para su posterior uso. El objetivo de este artículo es mostrar la aplicación de polioles derivados de PET, evaluados dentro de este artículo, para

la producción de otros materiales de valor agregado, como poliuretanos y copolímeros.

REACTIVOS

Carbonato de etileno (EC), hidróxido de potasio (KOH), 1,5,7- Triazabiciclo[4.1.0]hept-5-eno (TBD), dietilenglicol (DEG), ε-caprolactona (CL), hexametilendiisocianato (HDI), 2-etylhexanoato de estaño (II) ($\text{Sn}(\text{Oct})_2$), heptamolibdato de amonio (Hep) y 1,2-dicloroetano, se adquirieron de Sigma Aldrich. El PET molido se obtuvo de una empresa de reciclaje de León, Gto. Una vez obtenido el PET, se lavó y secó para su uso.

METODOLOGÍA

Para la comparación de metodologías de despolimerización de PET, se siguieron tres metodologías reportadas previamente.^[6-8] Las reacciones se realizaron siguiendo temperaturas y tiempos adecuados para cada una, utilizando agitación constante. Una vez finalizado el tiempo de reacción, se lavaron con agua destilada y se secaron.

Degradación de PET para obtención de polioles (PoliolPET)

- *Metodología 1* (Poliol_{PET}-1). En un matraz de 100 ml, se agregaron 0.5 g de PET, 1 g de EC y 0.5 g de KOH. Se colocó en un baño de silicona a 130 °C durante 24 horas.
- *Metodología 2* (Poliol_{PET}-2). En un matraz de 100 ml, se agregaron 3.9 g de PET y 2.3 g de DEG. Se colocó en un baño a 220 °C durante 4 horas.
- *Metodología 3* (Poliol_{PET}-3). En un matraz de 100 ml, se agregaron 5 g de PET, 12.5 g de EC y 0.25 g de TBD. Se colocó en un baño a 150 °C durante 18 horas.

Obtención de poliuretanos

En un matraz de fondo redondo de 50 ml se pesaron 1.5 g de Poliol_{PET} (1.4 mmol), se adicionaron 0.28 g de HDI (1.54 mmol), buscando una proporción diol-disiocianato de 1:1.05, y 3 mg de Sn(Oct)₂ como catalizador. Posteriormente se adicionaron 10 ml de DCE. Se colocó en baño de aceite a 80°C y se dejó agitando durante 3 horas. Después de 3 horas, se continuó con la reacción a temperatura ambiente por 21 horas más en agitación constante para permitir un aumento del peso molecular. Una vez finalizado el tiempo de reacción, se realizó un vaciado dejando evaporar lentamente el disolvente para formar una película.

Síntesis de copolímero con PCL

En un matraz de fondo redondo de 50 ml se pesaron 2.28 g de CL (20 mmol), se adicionaron 2 g de Poliol_{PET} (2 mmol) y 15 mg de Hep como catalizador, por 3 horas a 130 °C en agitación constante.

Caracterización

Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR). Técnica analítica que usa la radiación infrarroja para identificar y describir los materiales, se basa en la absorción de luz infrarroja por las moléculas, lo cual genera vibraciones que son las que

observamos en los espectros. Se registraron con el accesorio de espectroscopía de reflectancia total atenuada (ATR) en un espectrómetro Perkin-Elmer Spectrum One FT-IR. *Resonancia Magnética Nuclear (RMN).* Técnica que permite establecer la estructura molecular y la composición de un material, se fundamenta en las características magnéticas de los núcleos atómicos y su interacción con campos magnéticos. La RMN de ¹H se registró a temperatura ambiente en un espectrómetro Bruker Avance III HD de 500 MHz usando CDCl₃ como disolvente.

RESULTADOS

Degradación de PET para obtención de polioles (Poliol_{PET})

El PET empleado fue caracterizado mediante FTIR, obteniendo señales que coinciden con las ya reportadas en la literatura (Figura 2, línea negra). En la Figura 2 se observa la evolución química y visual del PET durante su proceso de transformación en polioles, cada línea representa una muestra distinta: el PET original (molido) y tres productos obtenidos tras someterlo a diferentes metodologías de degradación química (Poliol_{PET}-1, Poliol_{PET}-2 y Poliol_{PET}-3) (Líneas azules en Figura 2). En los espectros, la desaparición de ciertas señales características del PET y la aparición de nuevas señales indican que el material ha sido modificado exitosamente. Por ejemplo, las señales en la región cercana a los 1700 cm⁻¹ (señalados en verde en la Figura 2) sugiere la ruptura de enlaces éster, típicos del PET, mientras que las nuevas señales alrededor de 3400 cm⁻¹ están relacionadas con grupos hidroxilo (-OH), que aparecen en los polioles formados (señaladas en amarillo en la Figura 2). Además del análisis químico, se pueden notar diferencias visuales entre los productos finales: desde un polvo blanco hasta un líquido viscoso ámbar, lo que refleja no solo su evolución química sino también física y nos da una idea del proceso de degradación o despolimerización.

En la Tabla 1 se muestra un resumen de las condiciones de reacción y su impacto en la composición y el peso molecular de los polioles obtenidos a partir del reciclaje químico de PET. Al descomponer el

Tabla 1. Condiciones de síntesis y composición de polioles obtenidos a partir de PET reciclado mediante tres metodologías.

Nombre	Metodología ^a	t(h) ^a	T (°C) ^a	M_n RMN (g/mol) ^b	Resto EC ^c	%Composición mol ^b		
						Aromático	Carbonato	EG ^c
Poliol _{PET} -1	1	24	130	1290	0.52	26.11	9.40	64.49
Poliol _{PET} -2	2	4	220	960	-	29.24	0.58	70.18
Poliol _{PET} -3	3	18	150	1050	0.48	17.82	23.65	58.53

Metodología 1: Reacción de PET molido con EC y KOH. Metodología 2: Reacción de PET molido y DEG. Metodología 3: Reacción de PET molido con EC y TBD.

^b Determinado por RMN ¹H en CDCl₃.

^c Etilencarbonato (EC); Etilenglicol (EG)

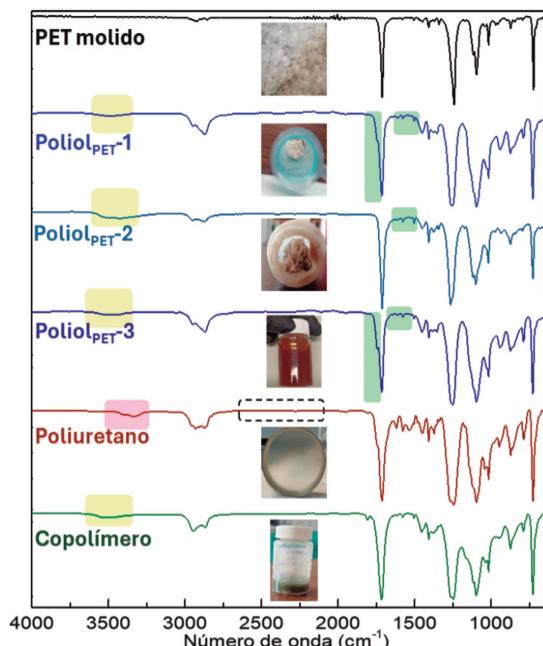
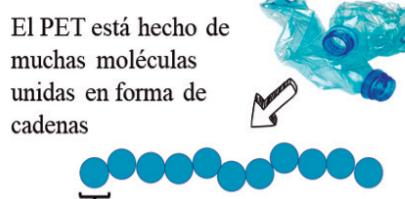


Figura 2. Espectros infrarrojos (FTIR) y fotografías de productos que muestran la transformación química del PET reciclado en polioles mediante tres metodologías, así como el poliuretano y el copolímero.

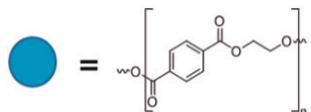
PET (Figura 3), se obtienen tres tipos principales de fragmentos: uno que proviene del anillo aromático (la parte rígida del plástico original), otro con grupos tipo carbonato ($\sim\text{CO}_3^{2-}$), y uno más con etilenglicol (EG), que es una parte flexible de la cadena. La señal de carbonato en el espectro de FTIR es especialmente pronunciada en el Poliol_{PET}-3, lo cual concuerda con su mayor contenido molar de unidades tipo carbonato (23.65%), según la Tabla 1. Esta coincidencia entre dos técnicas diferentes (FTIR y RMN) indica que la Metodología 3 fue la más eficaz para incorporar grupos carbonato durante el proceso de reciclaje. ¿Por qué es importante tener más grupos carbonatos? Estos grupos contribuyen a mejorar la utilidad de los polioles reciclados, facilitando su reacción durante el proceso de fabricación de poliuretanos. Además, estos grupos aportan mayor firmeza y resistencia al calor, lo que resulta beneficioso para el desarrollo de los materiales, abriendo la puerta a nuevas aplicaciones en materiales más duraderos o con funciones especiales, por ejemplo, en filtros de agua.

Aplicación química de Poliol_{PET}-3 para obtener poliuretano y copolímero

La obtención de polioles no solamente permite revalorizar residuos plásticos, también abre la puerta



Cada eslabón de la cadena representa a la unidad repetitiva del PET, que químicamente es:



Al degradar/despolarimerizar tenemos 3 fragmentos principales que derivan de esa unidad repetitiva

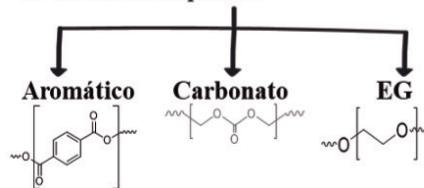


Figura 3. Constitución química del PET y fragmentos presentes al despolarimerizarlo.

a nuevas aplicaciones funcionales. En la Figura 4, se ilustra que el Poliol_{PET}-3 puede emplearse como materia prima para la síntesis tanto de copolímeros como de poliuretanos. Se realizó un poliuretano siguiendo la metodología descrita y utilizando HDI como diisocianato. Tras la reacción y evaporación del disolvente, se formó una película (Figura 3), lo que muestra la viabilidad de formar un material sólido con este tipo de poliol reciclado. El análisis por FTIR confirmó la aparición de bandas características del enlace uretano ($-\text{NH}-\text{CO}-\text{O}-$), como la banda ancha de estiramiento N-H ($\sim 3300 \text{ cm}^{-1}$) (mostrada en rosa en Figura 2), la señal del estiramiento C=O del grupo uretano ($\sim 1700 \text{ cm}^{-1}$) y la desaparición de las señales de isocianato sin reaccionar ($\sim 2270 \text{ cm}^{-1}$) (área punteada en Figura 2), lo que indica conversión exitosa. Por su parte, la RMN de ^1H mostró señales características de protones cercanos a los grupos uretano y carbonato, confirmando que el poliol reciclado participó activamente en la reacción.

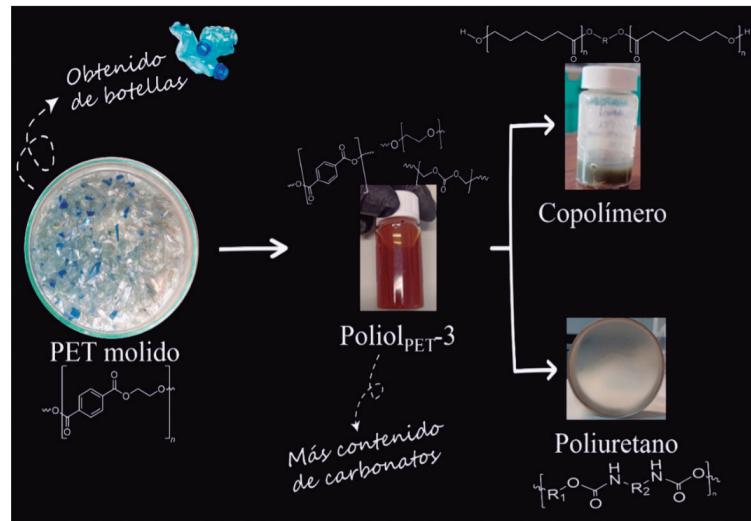


Figura 4. Ruta de transformación de botellas de PET en un poliol (Poliol_{PET}-3) que puede emplearse para producir copolímeros o poliuretanos, dando lugar a nuevos materiales funcionales a partir de residuos plásticos.

También se exploró la copolimerización del Poliol_{PET}-3 con ϵ -caprolactona (CL) para obtener un copolímero tipo poliéster. En este caso, el Poliol_{PET}-3 actúa como iniciador y forma bloques lineales de policapro-lactona (PCL) unidos al poliol. Se caracterizó mediante FTIR y RMN. En FTIR se observaron las señales típicas de los grupos éster ($\text{C}=\text{O}$ a $\sim 1720 \text{ cm}^{-1}$, $\text{C}-\text{O}$ a $\sim 1200 \text{ cm}^{-1}$) y mantiene bandas correspondientes a grupos carbonato del poliol, lo cual indica que este permanece como parte integral de la estructura del copolímero (Figura 2, línea verde). RMN de ^1H mostró las señales correspondientes a las unidades de CL polimerizadas (~ 4.0 , ~ 2.3 y $\sim 1.6 \text{ ppm}$), además de señales del poliol inicial, permitiendo confirmar la estructura tipo bloque.

CONCLUSIONES

Uno de los mayores retos y compromisos del contexto social y científico es transformar residuos en recursos. Este proyecto comparó tres metodologías y demostró que se pueden obtener polioles funcionales a partir de un residuo común y disponible como

lo son las botellas de PET. La caracterización de los polioles se realizó por FTIR y RMN, los cuales confirmaron estructura y funcionalidad de estos polioles. La metodología 3 es la más prometedora para obtener polioles con mejores propiedades, así, el Poliol_{PET}-3, hecho con residuos plásticos, es reactivo (gracias a su mayor porcentaje de carbonatos) y se pueden hacer con él nuevos materiales para recubrimientos, membranas o materiales más amigables con el medioambiente. Se transforma fácilmente en poliuretano o copolímero y tiene señales consistentes en FTIR y RMN. Este tipo de poliuretanos puede usarse como adhesivos,^[9] recubrimientos^[10] o membranas para filtrar agua^[11]; y en el caso de los copolímeros, tienen potenciales aplicaciones en biomedicina (como implantes o para la liberación controlada de fármacos) gracias a la PCL que contienen,^[12] en empaques o también para membranas de filtración de agua. Realizar esta transformación de PET a nuevos materiales (poliuretanos y copolímeros), abre la puerta a darles usos de otro valor como lo son las membranas de filtración de agua, siendo esta una de las perspectivas más interesantes que permita avanzar a soluciones en purificación de agua. Esto muestra que los residuos PET pueden tener una segunda vida como precursores útiles y versátiles en la química de materiales.

REFERENCIAS

- [1] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (Diciembre de 2020). *Panorama General de las Tecnologías de Reciclaje de Plásticos en México y en el Mundo*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/608513/89_2020_Documento_Plastico.pdf
- [2] Muringayil Joseph, T., Azat, S., Ahmadi, Z., Moini Jazani, O., Esmaeili, A., Kianfar, E., Haponiuk, J., & Thomas, S. (2024). Polyethylene terephthalate (PET) recycling: A review. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 9, 100673. doi:10.1016/j.cscee.2024.100673
- [3] Plastics Europe. (16 de Abril de 2025). *Plastics – the fast Facts 2024 • Plastics Europe*. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2024/>
- [4] ECOCE / Registro acopiadores. (n.d.). https://www.ecoce.mx/cifras_y_estadisticas
- [5] Mendiburu-Valor, E., Larraza, I., Echeverria-Altuna, O., Harismendy, I., Peña-Rodríguez, C., & Eceiza, A. (2023). Thermoset polyurethanes from biobased and recycled components. Journal of Polymers and the Environment, 31(11), 4946–4959. doi:10.1007/s10924-023-02891-1
- [6] Espinoza-García, K., Marcos-Fernández, A., Navarro, R., Ramírez-Hernández, A., Báez-García, J. E., & Rangel-Porras, G. (2019). Polymerization of ε-caprolactone with degraded PET for its functionalization. Journal of Polymer Research, 26(8). doi:10.1007/s10965-019-1821-6
- [7] de Dios Caputto, M. D., Navarro, R., Valentín, J. L., & Marcos-Fernández, Á. (2022). Chemical upcycling of poly(ethylene terephthalate) waste: Moving to a circular model. Journal of Polymer Science, 60(24), 3269–3283. doi:10.1002/pol.20220137
- [8] Fukushima, K., Coulembier, O., Lecuyer, J. M., Almegren, H. A., Alabdulrahman, A. M., Alsewailem, F. D., Mcneil, M. A., Dubois, P., Waymouth, R. M., Horn, H. W., Rice, J. E., & Hedrick, J. L. (2011). Organocatalytic depolymerization of poly(ethylene terephthalate). Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 49(5), 1273–1281. doi:10.1002/pola.24551
- [9] Cevher, D., & Sürdem, S. (2021). Polyurethane adhesive based on polyol monomers BHET and BHETA depolymerised from PET waste. International Journal of Adhesion and Adhesives, 105, 102799. doi:10.1016/j.ijadhadh.2020.102799
- [10] Cakić, S. M., Ristić, I. S., Cincović, M. M., Nikolić, N. Č., Nikolić, L. B., & Cvetinov, M. J. (2017). Synthesis and properties biobased waterborne polyurethanes from glycolysis product of PET waste and poly(caprolactone) diol. Progress in Organic Coatings, 105, 111–122. doi:10.1016/j.porgcoat.2016.10.038
- [11] Kusumocahyo, S. P., Ambani, S. K., Kusumadewi, S., Sutanto, H., Widiputri, D. I., & Kartawiria, I. S. (2020). Utilization of used polyethylene terephthalate (PET) bottles for the development of ultrafiltration membrane. Journal of Environmental Chemical Engineering, 8(6), 104381. doi:10.1016/j.jece.2020.104381
- [12] Waterkotte, T., He, X., Wanashathop, A., Li, S. K., & Park, Y. C. (2022). Long-Term Antibody Release Polycaprolactone Capsule and the Release Kinetics in Natural and Accelerated Degradation. ACS Biomaterials Science & Engineering, 8(10), 4428–4438. doi:10.1021/acsbiomaterials.2c00808

Perspectiva actual de los plásticos y el ácido poliláctico (PLA) como alternativa sostenible

Humberto Cruz Ramírez^{1*}, Miriam Paola Barrera Nava¹, Antonio Martínez Richa¹

¹ Posgrado en Química / División de Ciencias Naturales y Exactas / Campus Guanajuato / Universidad de Guanajuato

*h.cruzramirez@ugto.mx

INTRODUCCIÓN

Estamos consumiendo plásticos sin saberlo? ¿Qué tan perjudiciales son los microplásticos para la salud? ¿Cuánto tarda el plástico en degradarse? ¿Qué acciones podemos tomar para reducir la contaminación por plásticos? Estas son algunas de las preguntas más comunes que surgen en relación con el uso del plástico. En los últimos años, el interés científico sobre este material ha crecido significativamente, lo que ha dado lugar a múltiples investigaciones y diversas propuestas para mitigar sus efectos. Entre estas alternativas destacan los bioplásticos. El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la viabilidad del uso de fuentes renovables para la obtención de PLA y su potencial para reemplazar polímeros de origen fósil, contribuyendo así a la reducción del impacto ambiental de los plásticos convencionales.

CLASIFICACIÓN Y DESECHO DE LOS PLÁSTICOS

En la actualidad existen diversos tipos de polímeros, cuentan con su clasificación dependiendo de sus propiedades, método de elaboración, características, usos, etc. En la tabla 1 se encuentra una clasificación para reciclado de plástico a nivel mundial realizada por Plastics Industry Association (Sociedad de la Industria de los Plásticos) en 1988 que es muy útil para conocer diversos aspectos y propiedades de los plásticos, ayudar a la humanidad a catalogar, así como el uso de rechazar, reducir, reutilizar, reparar, restaurar, remanufacturar, re-proporcionar, reciclar, recuperar (9R) de la economía circular, también como método de protección y prevención en los plásticos (Coltro, 2008).

Tabla 1. Códigos de identificación de los plásticos en la que podemos observar en la primera columna su simbología, en la segunda columna el nombre del polímero y en la tercera columna las aplicaciones más comunes del plástico por código.

Simbología	Nombre del Polímero	Aplicaciones más comunes
	PET (POLIETILENO TEREFITALATO)	
	HDPE (POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD)	
	PVC (CLORURO DE POLIVINILO)	
	LDPE (POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD)	
	PP (POLIPROPILENO)	
	PS (POLIESTIRENO)	
	OTROS (MEZCLA DE OTROS PLÁSTICOS)	

Identificar el tipo de plástico que se manipula es fundamental para proteger la salud, ya que permite distinguir entre aquellos materiales seguros y los que pueden representar un riesgo, especialmente al estar en contacto con alimentos o bebidas. Algunos plásticos liberan sustancias tóxicas durante su degradación o cuando se exponen a factores abióticos. Por ejemplo, el PVC puede liberar dioxinas, furanos, cloruro de hidrógeno y plastificantes, mientras que el PS (poliestireno) puede liberar benceno, un monómero residual, entre otras sustancias nocivas (Buteler, 2019).

Otro objetivo importante de la clasificación de los plásticos es fomentar el consumo responsable y reducir el impacto ambiental derivado de una disposición inadecuada de estos materiales. La incorrecta gestión de residuos plásticos ha llevado a muchos países a implementar medidas más estrictas, tales como el cobro por kilogramo de desechos, la promulgación de leyes que regulan la clasificación y eliminación adecuada de los plásticos, y la instalación de máquinas de reciclaje que ofrecen incentivos económicos a los usuarios. Asimismo, se ha promovido una mayor educación ambiental y responsabilidad social, junto con el uso de tecnologías accesibles que permiten a la población informarse, aprender y adoptar prácticas más sostenibles en el consumo de plásticos (Pinto da Costa, 2020).

El propósito principal de la clasificación de los plásticos es educar al consumidor sobre el uso adecuado y la correcta disposición de los plásticos. Esta clasificación está estrechamente vinculada con los principios de las 9R de la economía circular, cuyo objetivo es maximizar el valor de los recursos, productos y materiales durante el mayor tiempo posible, evitando la generación de residuos; reduciendo el consumo de recursos naturales y disminuir la necesidad de producción masiva de plásticos, fomentar la gestión responsable de residuos y promover el desarrollo de materiales más sostenibles. Asimismo, buscar el reducir o eliminar el uso de plásticos y productos de un solo uso, como botellas de agua, refrescos, leche, alcohol, envases de detergentes, popotes, globos, entre otros. Este tipo de plásticos debería utilizarse lo menos posible, optando por alternativas biodegradables o reutilizables que permitan prolongar su vida útil y reducir su impacto ambiental.

PLA COMO IMPULSO E INCORPORACIÓN DE NUEVOS MATERIALES BIODEGRADABLES

Los plásticos de origen fósil seguirán influyendo en el presente y futuro gracias a sus buenas propiedades, bajo costo, versatilidad y gran variedad de ventajas que otorgan; no obstante, tienen desventajas como la contaminación provocada por su uso desmedido, formación de islas de plástico en los océanos, aumento de vertederos plásticos, aumento de microplásticos (ya que los polímeros tienden a degradarse con factores abióticos y bióticos). A pesar de que algunos de estos materiales llegan a degradarse parcialmente, la mayoría no llega a mineralizarse o degradarse al 100%, lo cual genera la problemática de los microplásticos o nanopartículas que finalmente entran a la cadena alimentaria de los seres vivos.

Los plásticos de origen fósil tienen un tiempo de degradación muy alto. Algunos ejemplos son: bolsa de plástico 55 años, empaques y utensilios de un solo uso 65-75 años, encendedores 150 años, PET 450 años, hilo de pesca 600 años, llantas 650 años. Existen otros polímeros cuyo tiempo de degradación supera los 1,000 o incluso 10,000 años (Greenpeace, 2017). Una clara desventaja de estos materiales no renovables es la dependencia y comodidad que generan, ya que contribuyen al cambio climático en todas sus etapas: desde su producción, pasando por su consumo, hasta su prolongada persistencia en el medio ambiente. Cada uno de estos procesos libera gases de efecto invernadero, agravando el impacto ambiental.

Para contrarrestar las desventajas del uso de plásticos derivados del petróleo, sin renunciar a sus beneficios, se han investigado alternativas biodegradables provenientes de recursos naturales. Uno de los polímeros más estudiados como alternativa es el ácido poliláctico (PLA), el cual puede obtenerse a partir de almidón presente en materias primas como el maíz, la caña de azúcar, la yuca o la papa. Entre las aplicaciones más comunes del PLA se encuentran; bolsas, envases, utensilios médicos e incluso implantes. El tiempo de degradación del PLA varía según su estereoisómero: el poliácido D-láctico (PDLA) se degrada en aproximadamente 14 meses, mientras que el poliácido L-láctico (PLLA) puede tardar hasta 22 meses (Mehta, 2005).

Con el objetivo de producir PLA de manera ambientalmente sostenible y con propiedades comparables a las de los polímeros comerciales actuales, se han empleado fuentes naturales de almidón extraídas mediante métodos termo-mecánico-químicos. En la figura 1 se muestran tres tipos de almidón provenientes de maíz, papa e higuerilla que fueron utilizados como fuente de carbono para llevar a cabo el proceso de fermentación láctica (FL).

La FL es un proceso celular anaeróbico (en ausencia de oxígeno) donde se utiliza la glucosa o alguna otra fuente de carbono como la sacarosa, lactosa, almidón entre otros para producir energía y como producto final obtenemos el ácido láctico (AL). Se utilizó la FL como ruta química para la producción de PLA ya que a diferencia de otras rutas químicas se necesitan solventes orgánicos, catalizadores, reactivos y condiciones que no son favorables para el medio ambiente y en cambio el trabajo es realizado por las bacterias

lácticas que pueden ser *Pediococcus*, *Leuconostoccus*, *Oenococcus*, *Streptococcus lactis*, *Lactobacillus pentosus*, *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus Bulgaricus*, *Lactobacillus leichmanii*, *Escherichia*, *Salmonella*, *Shigella*, *Proteus*, *Yersinia*, *Rhizopus oryzae*, hongos, protozoos y en los tejidos animales, etc. (Castro Aguirre, 2016).

Al concluir la FL se realizó una purificación del AL seguido de una polimerización para transformar el AL en PLA. Existen distintas rutas para esta polimerización. Una de ellas es la polimerización por apertura de anillo (ROP), en la cual inicialmente se convierte el AL a lactida, que sirve como monómero para la apertura de anillo y obtener PLA con pesos moleculares que varían de 1000 a 100000 Dalton (Da). Otra ruta polimérica es la polimerización por policondensación directa en la cual se usa como monómero el AL para obtener PLA con pesos moleculares de 1000 a 100000 Da aunque se han reportado pesos moleculares más bajos por esta ruta polimérica (Campozano Mendoza, 2022).



Figura 1.- Almidón extraído en el laboratorio de polímeros de la Universidad de Guanajuato, División de Ciencias Naturales y Exactas, proveniente de: 1) maíz (*Zea mays L.*), 2) papa (*Solanum tuberosum L.*) y 3) higuerilla (*Ricinus communis L.*).

Una vez finalizada la polimerización, el PLA puede alcanzar diversas formas, como filamentos, películas o líquidos viscosos, tal como se muestra en la figura 2. Sin embargo, una desventaja del PLA son sus propiedades mecánicas y térmicas, que suelen ser inferiores en comparación con otros polímeros convencionales. Por ello, recientemente se ha optado por mejorar sus características mediante la elaboración de compuestos, híbridos, mezclas, polímeros dibloque y nanocomuestos. En esencia, estos métodos consisten en incorporar materiales que aporten propiedades superiores al PLA, destacando así esas mejoras para dirigir el uso del material a aplicaciones específicas.

En la figura 2 se muestra un nanocompósito que empleó nanocelulosa como nanorefuerzo. La nanocelulosa se obtuvo a partir de recursos renovables y proporciona una mejora en las propiedades mecánicas, térmica y un aumento de área superficial lo que permite la realización de películas y membranas para tratamiento de agua. Asimismo, se ha comprobado que ambos materiales son biocompatibles con el cuerpo humano, lo que ha impulsado su uso en diversas aplicaciones médicas durante los últimos años.

Otros polímeros biodegradables que pueden emplearse para sustituir los polímeros sintéticos derivados del petróleo son: la policaprolactona, con

un tiempo de degradación de 22 meses; el almidón con 6 meses de degradación (MDD); la celulosa y el quitosano, ambos con aproximadamente 3 MDD; el polihidroxialcanoato con 6 MDD; y el polibutileno succinato con 12 MDD, entre otros (Gómez Alonzo Martínez, 2025).

CONCLUSIÓN

En 2023, se reportó una producción mundial de plásticos a gran escala de 413.8 millones de toneladas, de las cuales solo el 0.7 % corresponde a polímeros de origen renovable (Plastics Europe, 2024). Por ello, es fundamental enfatizar la importancia de un consumo responsable y consciente de estos materiales, así como de comprender los efectos del uso desmedido de plástico mediante fuentes de información verídicas.

Los esfuerzos que se han realizado por mitigar esta problemática han permitido probar otro tipo de materiales como sustitutos o refuerzo, siendo muchos de estos materiales alternativas naturales y biodegradables como lo es el PLA. Cabe destacar que los nuevos biopolímeros que se están desarrollando reflejan una tendencia creciente hacia la protección del planeta, promoviendo el uso más sostenible de sus recursos.



Figura 2. Tipos de PLA y derivados obtenidos del laboratorio de polímeros de la Universidad de Guanajuato, División de Ciencias Naturales y Exactas 1) filamentos, 2) nanocomuesto con nanocelulosa en forma de película, 3) película, 4) líquido viscoso y 5) membrana de filtración.

REFERENCIAS

- Buteler, M. (2019). El problema del plástico: ¿Qué es la contaminación por plástico y por qué nos afecta a todos? *Desde la Patagonia. Difundiendo Saberes*, 16(28), 56–60. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/109678/CONICET_Digital_Nro.9fbc68cb-0eb2-4000-b7f6-ac241af6e3f0_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Campozano Mendoza, J. R., & Riera, M. A. (2022). *Ácido poliláctico: una revisión de los métodos de producción y sus aplicaciones* (Tesis de titulación, Universidad Técnica de Manabí). *Publicaciones en Ciencias y Tecnología*, 16(1), 42–53. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6908007>
- Castro-Aguirre, E., Iñiguez-Franco, F., Samsudin, H., Fang, X., & Auras, R. (2016). Poly (lactic acid)—Mass production, processing, industrial applications, and end of life. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 333–366. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.03.010>
- Coltro, L., Gasparino, B. F., & Queiroz, G. de C. (2008). Reciclagem de materiais plásticos: A importância da identificação correta. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 18(2), 119–125. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282008000200008>
- Gómez Alonzo Martínez, A., Farías Cepeda, L., Narro Céspedes, R. I., & Enríquez Medrano, F. J. (2025). El futuro nos alcanza, la meta: La transición de los polímeros sintéticos a los biodegradables para un futuro sostenible. *CienciAcierta*, 21(81), 1–21. <https://revistas.uadec.mx/CienciaCierta/article/view/12>
- Mehta, R., Kumar, V., Bhunia, H., & Upadhyay, S. N. (2006). Synthesis of poly (lactic acid): A review. *Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews*, 45(4), 325–349. <https://doi.org/10.1080/15321790600702198>
- Pinto da Costa, J., Mouneyrac, C., Costa, M., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. (2020). The role of legislation, regulatory initiatives and guidelines on the control of plastic pollution. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 104, 1–14. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00104> Greenpeace España, Rose, W., & Parsons, G. (2017). *Plásticos en los océanos: Datos, comparativas e impactos* (pp. 1–5). Greenpeace España. https://archivo-es.greenpeace.org/espana/Global/espana/2016/report/plasticos/plasticos_en_los_oceanos_LR.pdf
- PlasticsEurope, EPRO & PEMRG. (2024). *Plastics – the fast Facts 2024*. PlasticsEurope. <https://plasticseurope.org/es/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2024/Plastics Europe+7>

Insectos al rescate de un mundo lleno de plástico

Kevin Ramírez Dávila¹, Mónica Aidée Ortiz
Márquez¹, Juana Elizabeth Reyes Martínez¹, Patricia
Nayeli Alva Murillo¹, Juan Pablo Huchin Mian¹

¹Departamento de Biología / División de Ciencias Naturales y Exactas / Universidad de Guanajuato

INTRODUCCIÓN

La contaminación plástica es un enorme monstruo que crece diariamente sin control. La producción masiva de plástico se ha convertido en una grave amenaza ambiental por lo que, de continuar esta tendencia se estima que la producción se duplique en los próximos 20 años, lo cual pondría en serios problemas al planeta. La sociedad consumista actual está acostumbrada a usar y desechar productos, como las botellas de agua y refrescos o las bolsas plásticas del supermercado. Por ello, no es raro encontrar basura prácticamente en cualquier lugar que miremos a nuestro alrededor (Figura 1). La deficiente gestión de los residuos por parte de las autoridades, sumada a la falta de conciencia ambiental en la sociedad, no hacen más que intensificar un problema que ya es actualmente alarmante.

Todos los plásticos están compuestos por derivados petroquímicos que pueden contener sustancias tóxicas y cancerígenas, como los aditivos y los plastificantes que les otorgan propiedades físicas como la durabilidad y flexibilidad. Entre los plásticos más comúnmente usados se encuentran el tereftalato de polietileno (PET), del que están hechas las botellas de agua y refrescos; el polietileno (PE), que sirven para hacer bolsas del supermercado y envolver alimentos; el poliestireno (PS), usados en contenedores de comida y empaque; y el cloruro de polivinilo (PVC), que son usados para fabricar tuberías para la construcción de drenajes en muchos hogares del mundo. Todos estos plásticos pueden persistir en el ambiente hasta 500 años antes de ser degradados por completo. Con el paso del tiempo, factores medio ambientales como la radiación UV, la humedad, los cambios de temperatura y las corrientes de aire, fragmentan y degradan al plástico en piezas más pequeñas llamadas microplásticos (MPs), los cuales son partículas diminutas con tamaño máximo de 5 mm; es decir, son más pequeños que una semilla de ajonjolí, pero algunos son tan diminutos que solo se pueden ver con una lupa o un microscopio. Además, dependiendo de su procedencia pueden generar millones



Figura 1. Contaminación por plásticos en Presa la Purísima, Guanajuato.

de partículas plásticas. Un claro ejemplo es el poliéster, (derivado del PET), el cual es comúnmente usado para la fabricación de la ropa que se vende en las tiendas, los cuales pueden liberar hasta 18,000,000 de fibras por cada 6 kg de ropa lavada (Galvão *et al.*, 2020). El mayor problema de la contaminación de los MPs es su presencia en todos los entornos, se encuentran en suelo, tierra y aire. Estas partículas pueden ser ingeridas por animales de todos los tamaños, causar obstrucciones de vías aéreas o digestivas, así como falsa saciedad, inanición y potencialmente la muerte. Recientemente, investigadores de la Universidad de Nankai en China descubrieron que las hojas

de las plantas pueden absorber y acumular MPs del aire y que éstos pueden ser transferidos a los vegetales que consumimos, como el apio, la lechuga y la espinaca (Li *et al.*, 2025). Este hallazgo pone en evidencia los riesgos que representa la contaminación plástica para la salud de los humanos y los animales en la naturaleza.

Este artículo tiene como objetivo dar a conocer que en la naturaleza podemos encontrar soluciones a los problemas por la contaminación de plásticos generados por el ser humano; por ejemplo, el uso insectos como degradadores de plástico.

¿CUÁL ES LA IMPORTANCIA DE LOS INSECTOS EN LA NATURALEZA?

Los insectos desempeñan un papel ecológico fundamental en los ecosistemas terrestres porque participan en procesos biológicos como la polinización de plantas y la descomposición de materia orgánica; además, son parte fundamental de las cadenas alimenticias; es decir, sirven de alimento y nutrientes para organismos de mayor tamaño, incluyendo a los humanos (Figura 2).

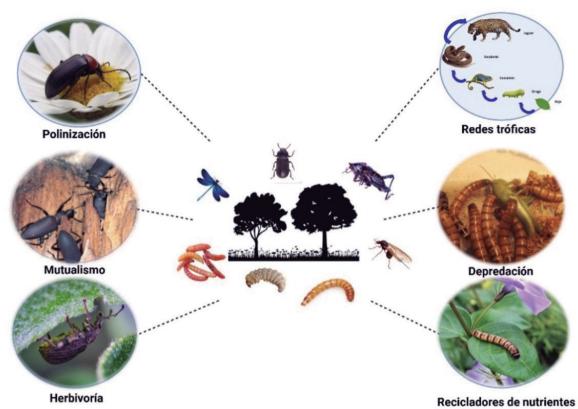


Figura 2. Función ecológica de los insectos en los ecosistemas terrestres. Los microplásticos llegan a los ecosistemas terrestres directamente mediante el desecho inadecuado de basura e indirectamente mediante deposición atmosférica.
Diseño de figura: Kevin Said Ramírez Dávila.

INSECTOS QUE COMEN PLÁSTICO

Estos pequeños animales debido al contacto constante con los plásticos en el medio ambiente han desarrollado mecanismos para sobrevivir y prosperar en estos entornos contaminados, presentando adaptaciones que incluyen desde cambios fisiológicos y de comportamiento. Entre los insectos que han mostrado un potencial para biodegradar plásticos y que han capturado la atención de la comunidad científica se encuentran los gusanos de cera (*Galleria mellonella*), gusanos de la harina (*Tenebrio molitor*) y el super gusano de la harina (*Zophoba morio*), los cuales tienen un estadio larvario entre 4 y 12 semanas, durante el cual son capaces de ingerir y degradar el plástico. En algunos casos, tienen la capacidad de biodegradar desde el 48.2% hasta el 70% del plástico ingerido como el unicel y bolsas plásticas compostables, respectivamente (Huidobro Medina et al., 2024; Lou et al., 2020; Palmer et al., 2022); y hasta el 33.8% del foami utilizado en manualidades (Yang et al., 2021), los cuales según la “Plastics Europe” son los tipos de plástico más desechados en el mundo.

La biodegradación de plásticos realizada por los insectos antes mencionados se debe a la acción de consorcios de microorganismos que residen en sus tractos digestivos, como las bacterias y los hongos. Entre los principales géneros de bacterias se encuentran *Pseudomonas*, *Bacillus*, y *Enterobacter*, así como hongos del género *Aspergillus*, *Penicillium*, *Cladosporium*, entre otros (Yang et al., 2023).

La degradación de los plásticos por los gusanos es un proceso lento que puede demorar hasta semanas. La clave para llevarlo a cabo son las enzimas que se encuentran en la saliva y su tracto digestivo. Las enzimas funcionan como si fueran pequeñas tijeras biológicas para cortar los compuestos del plástico a piezas más pequeñas. Por ejemplo, en la figura 3 se puede observar el interior de un gusano de la harina y cómo las enzimas junto con los microorganismos participan en la degradación, despolarización y oxidación de los plásticos ingeridos para obtener una fuente de energía.

Investigaciones recientes buscan identificar y caracterizar estas enzimas para entender mejor sus mecanismos de acción. Esto podría abrir la puerta a la

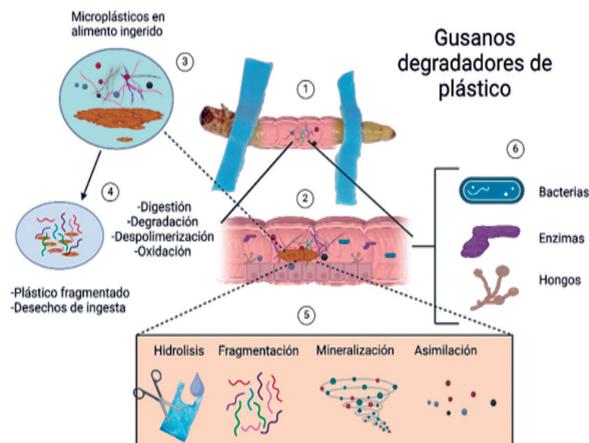


Figura 3. Procesos de degradación de plásticos en gusanos. (1) Larva de *Zophoba morio* inmovilizada. (2) Esquema del interior de su tracto digestivo. (3) Presencia de alimento y micropartículas en el tracto digestivo. (4) Digestión, degradación, despolarización y oxidación de los micropartículas. (5) Procesos de hidrolisis, fragmentación, mineralización y asimilación enzimática de los micropartículas. (6) Consorcios de microorganismos y enzimas degradadoras de polímeros plásticos.

ingeniería de enzimas más eficientes que pueden ser utilizadas a escala industrial para acelerar los procesos de biodegradación, ofreciendo una solución potencialmente revolucionaria para la gestión de residuos plásticos. Además, el estudio de estas enzimas podría revelar nuevas vías metabólicas y biológicas que los gusanos han desarrollado para sobrevivir en ambientes contaminados, proporcionando así un modelo valioso para la biotecnología ambiental.

Nuevos enfoques en la búsqueda de biorremediación ecológica en México

En México existen grupos de trabajo enfocados en el estudio de algunos insectos y consorcios bacterianos y fúngicos que podrían ser clave para encontrar técnicas eficientes en la degradación de algunos polímeros plásticos; por ejemplo, los tenebrioides son un grupo de gusanos que han mostrado tener especial capacidad de degradar bolsas de plástico compostables sin afectar su viabilidad y ciclo de vida hasta la fase adulta (Huidobro-Medina et al., 2024), así mismo se están realizando búsquedas de

enzimas bacterianas y fúngicas que puedan ser usadas del mismo modo como biorremediadores *in situ* o que puedan ser usados industrialmente en plantas tratadoras de residuos plásticos, con la finalidad de disminuir la contaminación plástica que vivimos hoy en día (Godoy *et al.*, 2025).

La efectividad de los insectos y sus enzimas digestivas para la degradación del plástico es prometedora. Sin embargo, también es importante estudiar el efecto que pueden causar los polímeros en la salud de los insectos. En el laboratorio de Ecología de la Universidad de Guanajuato, se ha analizado el efecto que causa el PET en la capacidad de los super gusanos de la harina para ingerir y degradar MPs durante su etapa larval (Figura 3). En este estudio se expusieron los gusanos a dietas con MPs en concentraciones de 2.5% y 5% (peso/peso), incorporado en una dieta suplementada en salvado de trigo y lechuga, bajo condiciones controladas ($24.4^{\circ}\text{C} \pm 4.1$; humedad: 29.7%) durante 32 días. Los resultados mostraron que las larvas se adaptaron a la ingesta de MPs sin alteraciones en el comportamiento, aunque tuvieron un peso ligeramente inferior al grupo control, no presentaron eventos de mortalidad. Por lo tanto, la ingesta de plástico no influyó en su apetito, crecimiento y supervivencia. Sin embargo, los análisis inmunológicos mostraron que, aunque es activada inicialmente una respuesta inmune humoral (fenoloxidasa, lisozima y catalasa) junto a una proliferación de células inmunitarias en la hemolinfa de los gusanos, los valores regresan a la normalidad a los pocos días, indicando una adaptabilidad progresiva al consumo de PET. Hasta la fecha no hay reportes de biodegradación de PET utilizando este modelo biológico, por lo que su uso biotecnológico abre las puertas a futuras líneas de investigación.

CONCLUSIÓN

La creciente demanda del plástico tiene consecuencias devastadoras para la salud ambiental y los organismos vivos. Aunque los plásticos parezcan indestructibles, la naturaleza nos ofrece una solución prometedora con el uso de insectos degradadores de plásticos. Al investigar y comprender sus



Figura 3. Gusano de la Harina (*Zophobas morio*).
Fotografía de Kevin Said Ramírez Dávila

mecanismos de degradación, podemos desarrollar estrategias biotecnológicas innovadoras para mitigar el impacto ambiental de los plásticos y avanzar hacia un futuro más sostenible. Sin embargo, existen desafíos importantes en el uso de gusanos como degradadores de plásticos y microplásticos que los científicos deberán tener en cuenta; entre ellos, 1) la lentitud y baja eficiencia del proceso de degradación, 2) la especificidad de los organismos para degradar ciertos plásticos, y 3) la dificultad de trasladar los resultados del laboratorio a entornos naturales. Es crucial abordar estos desafíos con investigaciones científicas y colaboraciones interdisciplinarias para lograr una solución sostenible para combatir la contaminación plástica y proteger a nuestro planeta.

Bibliografía

- Galvão, A., Aleixo, M., De Pablo, H., Lopes, C., & Raimundo, J. (2020). Microplastics in wastewater: Microfiber emissions from common household laundry. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(21), 26643-26649. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08765-6>
- Godoy, D. L. C., López, Y. C. Á., Gómez, A.-A. S., Martínez, D. M. T. S., Kirchmayr, D. M. R., Valdés, D. A. R. C., & Machuca, D. M. R. (2025). Prospección de enzimas microbianas para la biodegradación de plásticos a partir de un sitio con altos residuos plásticos sólidos en Tepic, Nayarit, México. *Revisa Bio Ciencias*, 12. <https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1913>
- Huidobro Medina, E. S., Rojas-Valencia, M. N., Fernández-Rojas, D. Y., & Araiza-Aguilar, J. A. (2024). Identification of Biodegradable, Compostable or Toxic Plastic Bags with Two Beetles of the Tenebrionidae Family. *Journal of Polymers and the Environment*, 32(3), 1244-1260. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-03013-7>
- Li, Y., Zhang, J., Xu, L., Li, R., Zhang, R., Li, M., Ran, C., Rao, Z., Wei, X., Chen, M., Wang, L., Li, Z., Xue, Y., Peng, C., Liu, C., Sun, H., Xing, B., & Wang, L. (2025). Leaf absorption contributes to accumulation of microplastics in plants. *Nature*, 641(8063), 666-673. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08831-4>
- Lou, Y., Ekaterina, P., Yang, S.-S., Lu, B., Liu, B., Ren, N., Corvini, P. F.-X., & Xing, D. (2020). Biodegradation of Polyethylene and Polystyrene by Greater Wax Moth Larvae (*Galleria mellonella* L.) and the Effect of Co-diet Supplementation on the Core Gut Microbiome. *Environmental Science & Technology*, 54(5), 2821-2831. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07044>
- OECD. (2022, junio 21). *Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060*. OECD Publishing, Paris. https://www.oecd.org/en/publications/global-plastics-outlook_aa1edf33-en.html
- Palmer, K. J., Lauder, K., Christopher, K., Guerra, F., Welch, R., & Bertuccio, A. J. (2022). Biodegradation of Expanded Polystyrene by Larval and Adult Stages of *Tenebrio molitor* with Varying Substrates and Beddings. *Environmental Processes*, 9(1), 3. <https://doi.org/10.1007/s40710-021-00556-6>
- Yang, S.-S., Ding, M.-Q., He, L., Zhang, C.-H., Li, Q.-X., Xing, D.-F., Cao, G.-L., Zhao, L., Ding, J., Ren, N.-Q., & Wu, W.-M. (2021). Biodegradation of polypropylene by yellow mealworms (*Tenebrio molitor*) and superworms (*Zophobas atratus*) via gut-microbe-dependent depolymerization. *Science of The Total Environment*, 756, 144087. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144087>
- Yang, X.-G., Wen, P.-P., Yang, Y.-F., Jia, P.-P., Li, W.-G., & Pei, D.-S. (2023). Plastic biodegradation by in vitro environmental microorganisms and in vivo gut microorganisms of insects. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1001750>

artículos

Microplásticos en la agricultura: consecuencias para la salud del suelo y la seguridad de los alimentos cultivados

Maria Elena López Pérez¹, Sarai Camarena Martínez¹,
Servando Reyes Castro¹, Graciela M.L. Ruiz Aguilar¹

¹División Ciencias de la Vida / Campus Irapuato-Salamanca / Universidad de Guanajuato

INTRODUCCIÓN

Los microplásticos (MPs) son definidos como polímeros menores a 5 mm y han sido ampliamente identificados en diversas matrices ambientales (agua, suelo y organismos vivos). Su diminuto tamaño, ubicuidad y durabilidad los han convertido en un foco de investigación ambiental (Wu et al., 2024). Así mismo, la presencia de MPs en los suelos agrícolas ha generado preocupación a nivel mundial, ya que su amplia dispersión podría poner en peligro la seguridad alimentaria y la salud humana (Tian et al., 2022).

Los estudios realizados alrededor del mundo muestran concentraciones altas de MPs en suelos agrícolas, sin embargo, el 74% de los estudios se basan solo en investigaciones en China (Chai et al., 2020; Wu et al., 2024; Zhang & Liu, 2018). Por el contrario, los datos de otros países como Alemania, Corea del Sur y Canadá muestran concentraciones de MPs considerablemente más bajas y variables (Wu et al., 2024). Cabe resaltar que no hay estudios hasta el momento reportados en suelos agrícolas para México, esto probablemente a que aún no se cuenta con un método estandarizado para la separación e identificación de MPs en suelo.

Los principales tipos de MPs presentes en el suelo agrícola provienen de la descomposición de materiales como polietileno (PE), poliamida (PA), polipropileno (PP),

poliestireno (PS) y cloruro de polivinilo (PVC). Estos polímeros son ampliamente utilizados por su notable durabilidad, resistencia mecánica, tolerancia a productos químicos, a la abrasión y a temperaturas extremas (Crawford & Quinn, 2017).

Entre las principales prácticas agrícolas que contribuyen a la presencia de microplásticos en el suelo se encuentran el uso de acolchados, cubiertas de invernadero y mangueras de material plástico, así como la aplicación de lodos provenientes de aguas residuales.

ACOLCHADO, CUBIERTAS DE INVERNADERO Y MANGUERAS

Las prácticas agrícolas que implican el uso de materiales plásticos, como los filmes para acolchado y las cubiertas utilizadas en invernaderos (figura 1), representan una fuente significativa de contaminación por MPs en los suelos agrícolas. La degradación de

estos plásticos ocurre a través de mecanismos naturales como la fotodegradación, la biodegradación y la oxidación, procesos que están modulados por variables ambientales tales como la radiación ultravioleta, la temperatura, la humedad y la actividad microbiana. Adicionalmente, intervenciones agronómicas como el uso de maquinaria pesada, la incorporación de agroquímicos (fertilizantes y pesticidas que pueden alterar la estructura química de los polímeros) y el laboreo intensivo del suelo, aceleran la fragmentación física de los plásticos en partículas de tamaño micro y nanométrico (Almeida-Sanisaca, 2025; Tian et al., 2022). La mayoría de estos materiales plásticos están compuestos de PE, un polímero termoplástico de alta estabilidad química y baja biodegradabilidad, ampliamente utilizado en aplicaciones agrícolas debido a su bajo costo, flexibilidad, y resistencia mecánica. Sin embargo, estas mismas propiedades son las que dificultan su descomposición completa en el ambiente, promoviendo su persistencia en el suelo en forma de MPs, lo que representa un riesgo potencial para la salud del ecosistema y la productividad agrícola a largo plazo (Naciones Unidas, 2022).



Figura 1. Acolchado y macro túnel para fresa. Foto: María Elena López Pérez.

La presencia de mangueras plásticas en suelos agrícolas (figura 2) representa una problemática ambiental en aumento. Aunque estos sistemas de riego ofrecen ventajas importantes, como la eficiencia en el uso del agua y la facilidad en la aplicación de agroquímicos, su inadecuada disposición final al término de su vida útil conlleva impactos ecológicos negativos. Además, a lo largo del tiempo, estos materiales plásticos sufren procesos de fragmentación física y degradación abiótica y biótica, generando los MPs que se integran al suelo agrícola. La presencia de MPs puede inducir alteraciones en la estructura del suelo, reducir su capacidad de retención de agua, interferir en los flujos biogeoquímicos y limitar la disponibilidad y absorción de nutrientes por parte de las plantas. Estas modificaciones no solo comprometen la funcionalidad y fertilidad del suelo, sino que también pueden afectar negativamente la productividad agrícola y representar un riesgo indirecto para la seguridad alimentaria (De Souza Machado et al., 2019; Kumari et al., 2022).

APLICACIÓN DE LODOS RESIDUALES

La incorporación de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales en suelos agrícolas constituye una práctica ampliamente utilizada, debido a su capacidad para mejorar la fertilidad edáfica. Estos materiales, ricos en materia orgánica y elementos nutritivos, contribuyen positivamente a la estructura del suelo, incrementan su capacidad de retención hídrica y optimizan la disponibilidad de nutrientes para el desarrollo vegetal (Potisek-Talavera et al., 2010). No obstante, su aplicación no está exenta de riesgos, ya que pueden contener patógenos, metales pesados y diversos contaminantes emergentes que requieren una gestión rigurosa. De manera particularmente relevante, se ha señalado que esta estrategia de enmienda agrícola puede introducir volúmenes significativos de MPs en los suelos, superando incluso las concentraciones detectadas en medios marinos (Wu et al., 2024).

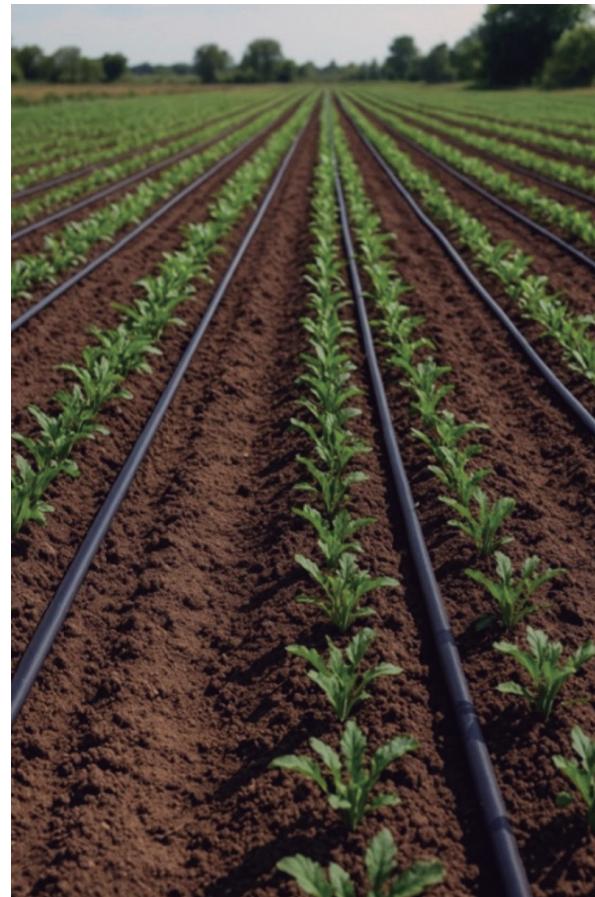


Figura 2. Mangueras de riego agrícola dispuestas entre hileras de cultivos. (OpenAI, 2025)

PRESENCIA DE MPs EN FRUTAS Y VERDURAS

Una vez que los MPs llegan a los suelos agrícolas, estos contaminantes pueden ser absorbidos por las plantas y transportados a distintas partes de los cultivos, incluyendo las raíces, tallos, hojas y frutos. Estudios han revelado la presencia de MPs en frutas y verduras de consumo cotidiano, lo que



Figura 3. Cultivo de zanahoria. Foto de <https://pixabay.com>

genera preocupación sobre su impacto en la seguridad alimentaria y la salud de los consumidores, ya que se relaciona con posibles alteraciones hormonales, inflamación intestinal y bioacumulación de sustancias tóxicas (Almeida-Sanisaca, 2025). Un estudio reportó la presencia de entre 52,050 y 233,000 partículas plásticas inferiores a 10 micrómetros en una variedad de frutas y hortalizas. Las manzanas y las zanahorias (figura 3) fueron identificadas como los productos con mayores niveles de contaminación, alcanzando concentraciones superiores a 100,000 MPs por gramo. Las partículas de menor tamaño se detectaron en las zanahorias, mientras que los fragmentos plásticos de mayor dimensión se hallaron en la lechuga, que, a su vez, presentó los niveles más bajos de contaminación entre las verduras analizadas (LaMotte, 2024).

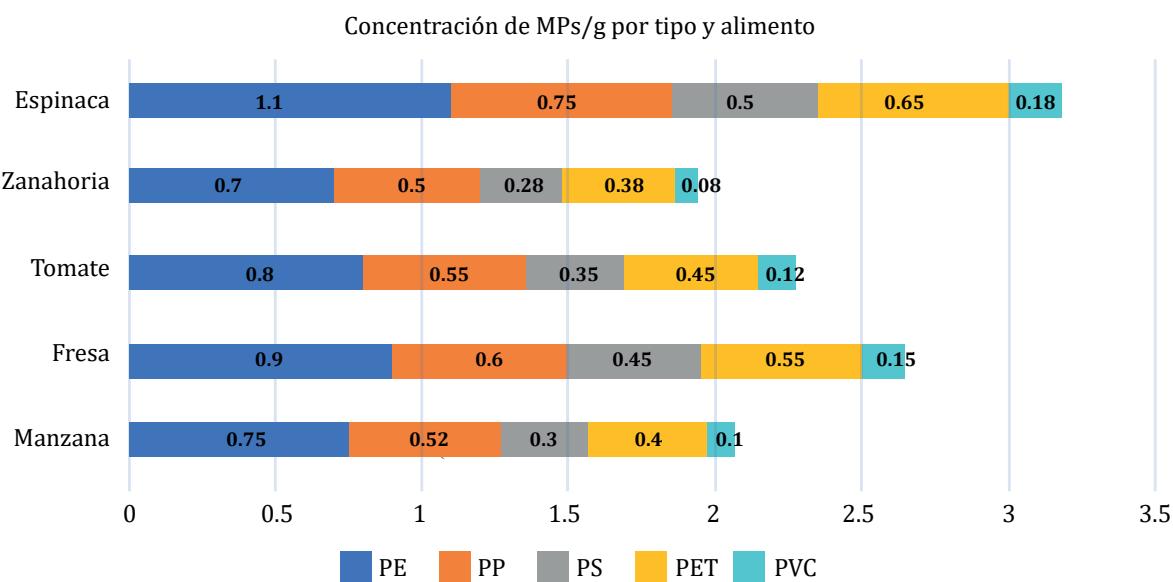


Figura 4. Concentración de diferentes tipos de MPs en frutas y hortalizas (Almeida-Sanisaca, 2025).

En una investigación llevada a cabo en Ecuador, se detectaron diversos tipos de MPs en muestras de frutas y hortalizas, utilizando técnicas como la espectroscopía FTIR y la microscopía electrónica para su análisis. Los resultados del análisis evidenciaron que las muestras de espinaca presentaron la mayor concentración de MPs correspondientes a PE, seguidas en menor proporción por partículas de polietileno tereftalato (PET) (figura 4; Almeida-Sanisaca, 2025).

CONCLUSIONES

Es fundamental avanzar hacia prácticas agrícolas más sostenibles que disminuyan la dependencia del plástico y contribuyan a la protección del entorno natural. Esto implica adoptar acciones como minimizar el uso de plásticos en el embalaje, el acolchado del suelo y otros insumos, además de promover el uso de alternativas ecológicas, como materiales biodegradables o compostables, y coberturas naturales como la paja o el compost. También es esencial impulsar la agricultura orgánica y respaldar la investigación y el desarrollo de tecnologías innovadoras.

Enfrentar la contaminación plástica en el ámbito agrícola representa un reto que demanda la cooperación de agricultores, autoridades, entidades medioambientales y consumidores. Solo mediante la implementación de prácticas responsables y la colaboración intersectorial será posible asegurar la sostenibilidad alimentaria y preservar el medio ambiente para las futuras generaciones.

REFERENCIAS

- Almeida-Sanisaca, J. C. A. (2025). Degradación del microplástico y su presencia en frutas y verduras: Estudio de caso en Ecuador. *Polo Del Conocimiento*, 10(3), 103–121.
- Chai, B., Wei, Q., She, Y., Lu, G., Dang, Z., & Yin, H. (2020). Soil microplastic pollution in an e-waste dismantling zone of China. *Waste Management*, 118, 291–301. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.048>
- De Souza Machado, A. A., Lau, C. W., Kloas, W., Bergmann, J., Bachelier, J. B., Faltin, E., Becker, R., Görlich, A. S., & Rilling, M. C. (2019). Microplastics Can Change Soil Properties and Affect Plant Performance. *Environmental Science and Technology*, 53(10). <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01339>
- Kumari, A., Rajput, V. D., Mandzhieva, S. S., Rajput, S., Minkina, T., Kaur, R., Sushkova, S., Kumari, P., Ranjan, A., Kalinichenko, V. P., & Glinushkin, A. P. (2022). Microplastic Pollution: An Emerging Threat to Terrestrial Plants and Insights into Its Remediation Strategies. In *Plants* (Vol. 11, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/plants11030340>
- LaMotte, S. (2024, April 22). *Which foods have the most plastics? You may be surprised.* [Https://Edition.Cnn.Com/2024/04/22/Health/Plastics-Food-Wellness-Scn/Index.Html](https://Edition.Cnn.Com/2024/04/22/Health/Plastics-Food-Wellness-Scn/Index.Html).
- Naciones Unidas. (2022, October 17). *Los microplásticos en la agricultura podrían estar afectando la seguridad alimentaria.* [Https://News.Un.Org/Es/Story/2022/10/1516177](https://News.Un.Org/Es/Story/2022/10/1516177).
- OpenAI. (2025). Imagen generada por inteligencia artificial con ChatGPT [Imagen generada por IA]. In *ChatGPT*. <https://chat.openai.com>.
- Potisek-Talavera, M. del C., Figueroa-Viramontes, U., González-Cervantes, G., Jasso-Ibarra, R., & Orona-Castillo, I. (2010). Aplicación de biosólidos al suelo y su efecto sobre contenido de materia orgánica y nutrientes. *Terra Latinoamericana*, 28(4).
- Tian, L., Jinjin, C., Ji, R., Ma, Y., & Yu, X. (2022). Microplastics in agricultural soils: sources, effects, and their fate. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 25, 100311. <https://doi.org/10.1016/J.COESH.2021.100311>
- Wu, J. yong, Gao, J. min, Pei, Y. zhi, Luo, K. yan, Yang, W. hao, Wu, J. cheng, Yue, X. hui, Wen, J., & Luo, Y. (2024). Microplastics in agricultural soils: A comprehensive perspective on occurrence, environmental behaviors and effects. *Chemical Engineering Journal*, 489, 151328. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2024.151328>
- Zhang, G. S., & Liu, Y. F. (2018). The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China. *Science of The Total Environment*, 642, 12–20. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.06.004>

artículos

Uso de herramientas de fabricación digital para reducir la contaminación por plásticos

Antonio Arias¹, Jesús Méndez¹, María Ortega¹, Alan Arias²,
Antonio Horta³, Norma Gutiérrez³, Alma Serafín³

¹División de Arquitectura, Arte y Diseño / Universidad de Guanajuato, ²Doctorado en Ciencias del Agua / Universidad de Guanajuato, ³Departamento de Ingenierías Civil y Ambiental / División de Ingenierías / Universidad de Guanajuato

INTRODUCCIÓN

Cada año, el mundo produce alrededor de 400 millones de toneladas de plástico. Esta cifra, reportada por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) en 2022, equivale al peso de casi 1.2 millones de aviones comerciales o a más de 50 veces el peso de toda la población humana (1). Esta alarmante cifra ha dado paso a tres grandes problemas; El primero, la contaminación plástica y el daño a los ecosistemas, presentando problemas como la inhibición del crecimiento de plantón, base fundamental de la vida marina, la intoxicación por ingesta de plástico y privación del movimiento en pequeñas especies al quedar atrapadas entre los residuos (2). El segundo, se trata del plástico en pequeños fragmentos a los cuales se les denomina micro plásticos y nano plásticos, los cuales pueden introducirse al cuerpo humano y se han detectado en testículos, pulmones y leche materna (3). La última y tercera problemática es la contribución de estos residuos al cambio climático, se estima que las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de la producción, el uso y la eliminación de plásticos podrían representar el 19 % del presupuesto global total de carbono para 2040 (4).

Ante esta problemática, han surgido diversas alternativas que buscan mitigar el impacto del plástico utilizando herramientas de fabricación digital. Una de ellas es la impresión 3D, una tecnología explorada por varios proyectos con enfoque ecológico. Destaca el caso de XtreeE, una empresa que, en colaboración con científicos y autoridades ambientales, creó un arrecife de coral impreso en 3D en el Parque Nacional de Calanques,

en el sur de Francia, con el fin de restaurar un hábitat ecológico en peligro de desaparición (5). Por otra parte, *Refil*, una empresa holandesa dedicada a reciclar plásticos de diversas industrias y convertirlos en filamentos de impresión 3D, ha logrado producir 4 tipos filamentos 100% reciclados: ABS, obtenido de tableros de automóviles; PET, derivado de botellas plásticas; PLA, producido a partir de residuos comúnmente usados en envases y bandejas; y HIPS, fabricado a partir del reciclaje de refrigeradores viejos. Este proyecto es impulsado por el estudio de diseño Better Future Factory, y representa una solución creativa que aprovecha los desechos como recurso para la fabricación digital (6).

Dentro de este marco, el presente proyecto empleó herramientas de fabricación digital para producir piezas de laboratorio a partir de materiales considerados como desechos. Los objetos fabricados incluyeron gradillas (de distintos tamaños), tapas para matraces aforados y charolas de pesado. Esta iniciativa busca no solo ofrecer soluciones prácticas, sino

también demostrar el potencial de la reutilización de materiales y la fabricación digital en contextos educativos y científicos con recursos limitados.



Figura 1. Arrecife creado mediante impresión 3D por la empresa Xtree (izquierda), filamento PET generado a partir de botellas (derecha). Tomada de Top 10 de iniciativas que combinan la impresión 3D y la ecología: <https://www.3dnatives.com/es/top-10-de-iniciativas-que-combinan-la-impresion-3d-y-la-ecologia-19012016/#!>.

METODOLOGÍA



Figura 2. Esquema de la metodología Utilizada.

RESULTADOS

Los materiales de laboratorio requeridos —gradillas (en tamaños para tubos de ensayo de 10, 15 y 50 mL), tapas para matraces aforados y charolas de peso— fueron diseñados y fabricados exitosamente mediante herramientas de fabricación

digital y residuos encontrados en el mismo laboratorio. Cada uno de estos utensilios cumplió con su función esperada, permitiendo su uso cotidiano en las prácticas de laboratorio sin inconvenientes. En particular, las gradillas mejoraron su funcionalidad al diseñarse como piezas modulares que pueden ensamblarse entre sí, facilitando su almacenamiento y adaptabilidad a distintos volúmenes de trabajo.

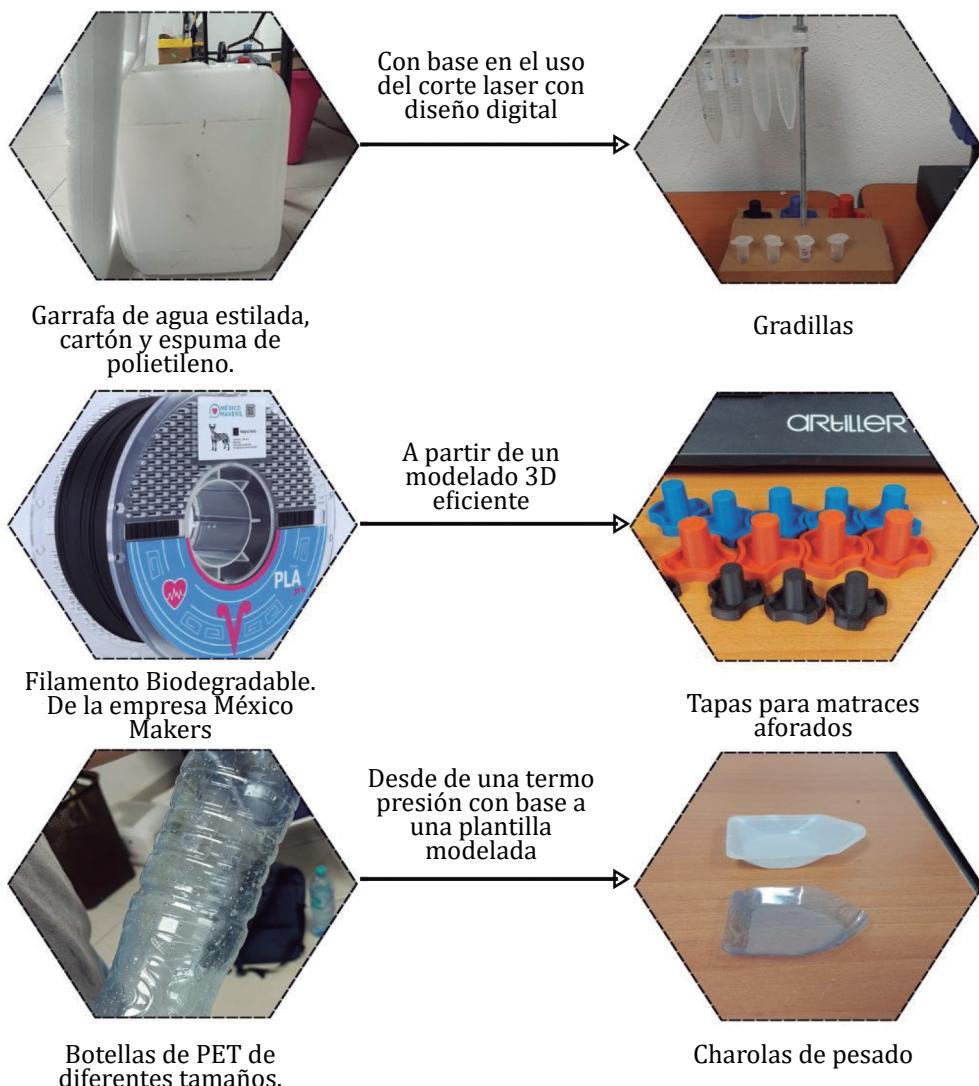


Figura 3. Materiales de laboratorio construidos a partir de residuos.

Además de los beneficios en la reducción, reciclaje y reutilización de insumos plásticos, al comparar los precios del mercado con los costos de fabricación en el marco de este proyecto, se evidenció un ahorro considerable. Mientras que las gradillas comerciales oscilan entre \$143 y \$417 MXN, la fabricación de una gradilla mediante herramientas de fabricación digital tuvo un costo aproximado de \$25 MXN considerando el costo energético y de material. Las tapas para matraces aforados, que en el mercado se venden entre \$186 y \$290 MXN por unidad, fueron reproducidas por menos de \$10 MXN cada una. En cuanto a las charolas de pesado, cuyo precio comercial ronda entre \$300 y \$1,000 MXN por cada 100 piezas, su elaboración costó alrededor de \$1.50 MXN por unidad. Estas diferencias reflejan el potencial de la fabricación digital como una alternativa económica, especialmente útil en contextos educativos con recursos limitados, permitiendo satisfacer necesidades básicas de laboratorio sin depender de insumos costosos o escasos.

CONCLUSIONES

Se lograron diseñar y fabricar materiales de laboratorio funcionales y adaptados a las necesidades específicas del usuario, lo que demuestra que es posible sustituir insumos costosos mediante soluciones accesibles y sostenibles. Esta experiencia permitió evitar la adquisición de nuevos productos plásticos, promoviendo además el aprovechamiento de materiales reutilizables. La elaboración de gradillas, tapas

para matraces aforados y charolas de pesado se llevó a cabo con un presupuesto considerablemente bajo, lo que resalta el potencial de la fabricación digital como una alternativa viable para entornos educativos con recursos limitados, fortaleciendo la autonomía y la creatividad en la resolución de necesidades cotidianas del laboratorio.

REFERENCIAS

- [1] OECD [Internet]. [citado 30 de mayo de 2025]. Plastics. Disponible en: <https://www.oecd.org/en/topics/plastics.html>
- [2] Answering 10 pressing questions about plastic pollution [Internet]. [citado 30 de mayo de 2025]. Disponible en: <https://www.unep.org/news-and-stories/story/answering-10-pressing-questions-about-plastic-pollution>
- [3] Qian N, Gao X, Lang X, Deng H, Bratu TM, Chen Q, et al. Rapid single-particle chemical imaging of nanoplastics by SRS microscopy. Proceedings of the National Academy of Sciences. 16 de enero de 2024;121(3):e2300582121.
- [4] Plásticos y cambio climático: ¿una relación saludable? by United Nations Development Programme - United Nations Development Programme | UNDP - Exposure [Internet]. [citado 30 de mayo de 2025]. Disponible en: <https://stories.undp.org/plasticos-y-cambio-climatico>
- [5] La restauración de los arrecifes de coral con impresión 3D [Internet]. [citado 30 de mayo de 2025]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/coral-con-impression-3d-060720182/>
- [6] C L. Impresión 3D y la ecología: 12 iniciativas que cambiarán el mundo [Internet]. 3Dnatives. 2019 [citado 30 de mayo de 2025]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/top-10-de-iniciativas-que-combinan-la-impresion-3d-y-la-ecologia-19012016/>

artículos

¿Puede la inteligencia artificial ayudarnos a combatir el plástico en los océanos?

Eduardo Sánchez-Ramírez¹, Brenda Huerta-Rosas¹,
Maricruz Juarez-García¹, Juan Gabriel Segovia-Hernández¹

¹Universidad de Guanajuato / Noria Alta s/n, Guanajuato 36050, México.

Palabras clave: Inteligencia Artificial, Sostenibilidad, Innovación

INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores retos en la actualidad es la contaminación por plástico en los océanos que implica impactos severos en la biodiversidad marina (Ning et al., 2024). En cuanto a la magnitud del problema, las cifras son alarmantes. Se estima que alrededor del 80% de la basura marina a nivel mundial está compuesta por plásticos (Thushari & Senevirathna, 2020). Se calcula que entre 8 y 10 millones de toneladas métricas de plástico terminan en los océanos cada año y que al menos 800 especies marinas han sido afectadas por estos desechos a través de la ingestión o el enredo. La avalancha de desechos flotantes se acumula en gigantescas "sopas de plástico" oceánicas, como la gran mancha del Pacífico, y alcanza incluso las regiones más remotas del planeta. Modelos globales estiman que actualmente flotan en los mares trillones de fragmentos de plástico de todos los tamaños (Eriksen et al., 2014), y la tendencia va en aumento. El panorama en México no es ajeno a esta problemática. En 2015, Norteamérica generó 29 millones de toneladas de desechos plásticos, y se proyecta que para 2060 México por sí solo producirá más de 4.5 millones de toneladas anuales de residuos plásticos.(Griffin et al., 2022). Debido a la gestión inadecuada, una fracción de esos residuos acaba en ríos y océanos.

Frente a la magnitud del desafío surge un campo de innovación prometedor: el uso de la inteligencia artificial (IA) para combatir la contaminación por plásticos en los océanos. En años recientes, nuevas tecnologías han comenzado a contribuir en la lucha contra la contaminación plástica marina. En el área de la inteligencia artificial, por ejemplo, se están desarrollando sistemas de monitoreo basados que, apoyados con imágenes satelitales, cámaras y drones, permiten detectar y mapear residuos plásticos en

océanos y costas de forma cada vez más eficiente (Ribotti et al., 2024). Estas herramientas pueden identificar acumulaciones de basura flotante o restos en playas, facilitando la localización de “puntos críticos” de contaminación para su limpieza oportuna. ¿Puede la tecnología ser aliada en esta batalla? El presente artículo tiene como objetivo analizar cómo la inteligencia artificial, en particular, puede contribuir a la detección y mitigación de la contaminación por plástico en los ambientes marinos, evaluando el alcance de estas herramientas emergentes y su potencial como aliadas en la protección de nuestros océanos.

SOLUCIONES AMBIENTALES IMPULSADAS POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL

La inteligencia artificial (IA) es un campo de la informática enfocado en crear sistemas capaces de realizar tareas que normalmente requieren la inteligencia

humana, como aprender de la experiencia, reconocer patrones o tomar decisiones. Una de las grandes fortalezas de la IA es su capacidad para analizar enormes cantidades de datos y encontrar en ellos patrones complejos que a los humanos nos tomaría demasiado tiempo descubrir. Los sistemas de IA pueden procesar datos masivos o macrodatos (lo que suele llamarse *Big Data*) de forma rápida, extrayendo información útil y revelando relaciones sutiles. En el área ambiental, la IA ya está teniendo un impacto notable al permitir nuevas formas de monitorear y proteger los ecosistemas. A continuación, se describen algunas aplicaciones ambientales destacadas de la inteligencia artificial (Figura 1):

- Detección de residuos plásticos en océanos: Mediante técnicas de visión por computadora, la IA puede identificar basura plástica flotando en el mar a partir de imágenes satelitales. Una herramienta útil en esta tarea son las redes neuronales artificiales, que son sistemas de procesamiento

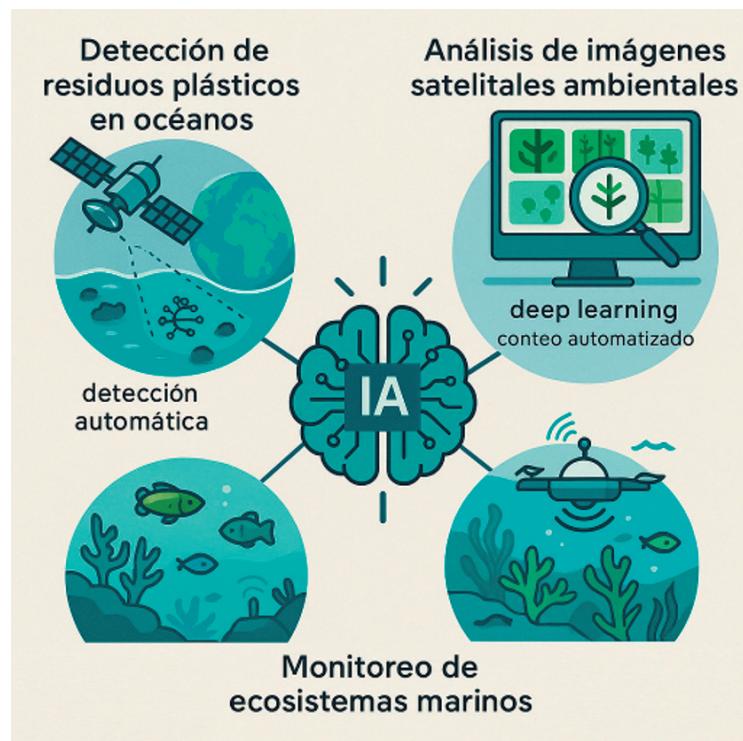


Figura 1. Aplicaciones de la inteligencia artificial en el monitoreo y protección ambiental. *Imagen de autoría propia diseñada con ayuda de IA

que imitan la forma en que el cerebro humano procesa información para aprender, predecir y resolver problemas. Por ejemplo, en un estudio se entrenó una red neuronal profunda para analizar automáticamente imágenes del satélite Sentinel-2 (una misión de observación de la tierra que proporciona imágenes de alta resolución multiespectrales de la superficie terrestre) que suman varios terabytes de datos para detectar acumulaciones de desechos marinos. El modelo aprendió a reconocer plásticos flotantes a partir de miles de ejemplos proporcionados por expertos, logrando localizar "islas" de basura en el océano con alta precisión. Esta automatización significa que se pueden vigilar extensas zonas costeras casi en tiempo real, algo impracticable manualmente, facilitando la limpieza y gestión de residuos en mares y playas (Rußwurm et al., 2023).

En este sentido la IA potencia el uso de teledetección para estudiar el medio ambiente desde el espacio. Un algoritmo de *deep learning*, un tipo de aprendizaje automático conocido así por utilizar redes neuronales multicapa, puede recorrer millones de imágenes satelitales en busca de cambios sutiles en la superficie terrestre o el océano. Por ejemplo, se ha conseguido contar árboles uno por uno en imágenes de satélite: un modelo identificó 1,800 millones de árboles individuales en un área de 1.3 millones de km², mapeando la cobertura vegetal con gran detalle (Ditria et al., 2022).

- Monitoreo de ecosistemas marinos: La inteligencia artificial está revolucionando cómo se observan los océanos. Gracias a sensores autónomos, cámaras submarinas, vehículos no tripulados (*drones*) y boyas inteligentes, es posible recolectar datos continuos del ambiente marino (imágenes, sonidos, parámetros fisicoquímicos) y luego analizarlos con IA. Esto permite rastrear la salud de arrecifes de coral, estimar poblaciones de peces o mamíferos marinos, e incluso detectar especies invasoras o señales de sobre pesca de forma automática. (Ditria et al., 2022).

Así, la inteligencia artificial ofrece herramientas poderosas para la comunidad científica y gestora del medio ambiente. Sus capacidades de procesamiento y aprendizaje permiten abordar problemas ambientales con un nivel de detalle y escala antes imposible:

desde vigilar océanos, bosques y especies en peligro, hasta optimizar modelos climáticos y sistemas de alerta temprana.

IA EN ACCIÓN: DETECCIÓN DE BASURA MARINA

Esta sección explora tres de las aplicaciones más prometedoras: el uso de drones, imágenes satelitales y redes neuronales profundas para enfrentar la creciente acumulación de plásticos en los océanos (Figura 2).

Drones con visión artificial para identificar basura flotante

Los drones, o vehículos aéreos no tripulados, se han convertido en aliados valiosos para vigilar zonas costeras y marinas. Equipados con cámaras de alta resolución y sensores multiespectrales, estos dispositivos pueden sobrevolar áreas extensas y capturar imágenes que luego son analizadas mediante **algoritmos de visión por computadora**. La IA permite procesar estas imágenes para **detectar objetos plásticos en playas, riberas y aguas superficiales**, diferenciándolos del entorno natural. Por ejemplo, (Maharjan et al., 2022) desarrollaron un sistema basado en aprendizaje profundo que analiza imágenes captadas por drones para localizar residuos plásticos en entornos costeros con una precisión del 92%. Esta capacidad es fundamental para optimizar las labores de limpieza y para la planificación ambiental en zonas vulnerables. Además, tecnologías como el proyecto **WasteShark**, un dron acuático autónomo, han demostrado que también es posible recolectar residuos flotantes de forma automatizada en cuerpos de agua urbanos y marinos, combinando navegación inteligente y detección de objetos por IA (Hölzle et al., 2022).

Satélites y modelos predictivos para rastrear plásticos en movimiento

A escala global, el seguimiento de desechos plásticos en el océano abierto plantea un gran desafío. Gracias a datos ópticos y multiespectrales de satélites como



Figura 2. Aplicaciones de la inteligencia artificial para la detección automatizada de residuos plásticos marinos mediante drones, satélites y redes neuronales.
*Imagen de autoría propia diseñada con ayuda de IA

Sentinel-2 (misión Copernicus de la Agencia Espacial Europea), ahora es posible detectar **manchas flotantes de basura marina** en alta mar, sobre todo en zonas de acumulación como giros oceánicos. Un estudio reciente de (Rußwurm et al., 2023) aplicó redes neuronales convolucionales, utilizadas para el reconocimiento y clasificación de imágenes y objetos, para analizar miles de imágenes satelitales, detectando presencia de basura marina con precisión sorprendente. El algoritmo fue entrenado para distinguir entre residuos plásticos y otros objetos flotantes naturales, como algas o madera, y logró identificar patrones de acumulación que se correlacionan con datos de campo.

Redes neuronales para distinguir residuos de organismos marinos

Uno de los mayores desafíos en la clasificación automatizada de imágenes marinas es la **semejanza visual entre plásticos y elementos naturales**, como medusas, algas o bolsas de aire en el agua. Un caso destacado es el trabajo de (Topouzelis et al., 2019), quienes entrenaron un sistema de IA para analizar imágenes captadas desde drones y satélites, distinguiendo entre desechos plásticos y fauna marina flotante. Gracias al uso de conjuntos de datos etiquetados por expertos y técnicas de aprendizaje supervisado, el modelo alcanzó altos niveles de sensibilidad y especificidad. Este tipo de inteligencia visual permite que los sistemas no solo “vean”, sino que **comprendan** lo que están viendo, lo que abre la puerta a sistemas de monitoreo autónomo capaces de operar sin supervisión humana constante.

Robots recolectores y sistemas automatizados

La inteligencia artificial se ha convertido en una aliada clave para la **limpieza inteligente** de los océanos, impulsando robots recolectores y sistemas automatizados capaces de optimizar la recolección de residuos plásticos. Proyectos a gran escala como **The Ocean Cleanup** integran algoritmos avanzados de **posicionamiento, predicción y limpieza** basados en IA para retirar plásticos del mar de manera eficiente. Esta organización emplea software de **visión artificial** (basado en aprendizaje automático) que analiza imágenes de cámaras con GPS (Global Positioning System por sus siglas en inglés) para mapear dónde se acumula la basura flotante, ayudando a posicionar sus sistemas de recolección en las zonas más afectadas (de Vries, 2022). Asimismo, modelos predictivos y algoritmos de optimización de rutas permiten planificar la limpieza de forma autónoma (por ejemplo, determinar la trayectoria óptima de sus barcos recolectores según la densidad de plásticos). Un estudio reciente mostró que tales algoritmos pueden aumentar la eficiencia de recolección en más de un **60%**, sin añadir costos operativos, acelerando el avance hacia océanos más limpios (den Hertog et al., 2024). La IA también impulsa nuevos **drones marinos autónomos** para recoger

basura. Estos pequeños botes robotizados navegan por la superficie y recolectan residuos flotantes de forma automática. Equipados con cámaras, son capaces de detectar objetos como botellas o bolsas plásticas en el agua y diferenciarlos de la fauna marina u otros elementos naturales, asegurando que solo capturen desechos. Un ejemplo es *Clearbot*, un bote eléctrico autónomo que emplea visión artificial para **identificar desechos flotantes** y acercarse a ellos de forma inteligente, evitando obstáculos; su algoritmo optimiza la ruta para **maximizar la recolección** en cada recorrido (Deayton, 2022).

CASOS REALES Y AVANCES ACTUALES

WasteShark: drones acuáticos para limpiar residuos flotantes. Uno de los desarrollos innovadores en la lucha contra la contaminación plástica es *WasteShark*, un dron acuático autónomo diseñado para recolectar basura flotante en puertos, ríos y otros cuerpos de agua urbanos. Inspirado en el tiburón ballena (un filtrador natural), este dispositivo navega la superficie del agua “devorando” residuos plásticos, algas y otros desechos en su trayecto. Puede recoger hasta aproximadamente 200 litros de basura en un solo viaje y operar por varias horas continuas con cero emisiones directas. *WasteShark* ha sido desplegado en puertos de Europa, Asia y Norteamérica, donde ayuda a retirar objetos plásticos *antes* de que lleguen mar adentro. Además de recolectar desechos, estos drones suelen incorporar sensores ambientales, recopilando datos de calidad del agua (pH, salinidad, etc.) que resultan útiles para monitorear la salud del ecosistema marino local (Han, 2025).

Predicción de acumulaciones plásticas en playas mediante IA. Otra aplicación emergente de la inteligencia artificial se enfoca en anticipar *dónde y cuándo* se acumularán desperdicios plásticos en las costas. En los últimos años, científicos de datos de la empresa IBM (International Business Machines), en colaboración con instituciones ambientales, han desarrollado herramientas de *machine learning* para predecir vertimientos o acumulaciones de plásticos en playas. Estas herramientas analizan grandes

volúmenes de datos —por ejemplo, información de limpiezas costeras pasadas, patrones de viento y corrientes oceánicas, densidad de población cercana y otras variables ambientales— con el fin de identificar tendencias y factores que influyen en la llegada de basura marina a determinadas costas. Mediante modelos de aprendizaje automático (como redes neuronales o enfoques probabilísticos), es posible pronosticar cuánta basura podría depositarse en una playa en el futuro inmediato e incluso estimar la evolución a varios años vista (Granado et al., 2019).

Detección de microplásticos mediante aprendizaje automático. Un desafío especial lo presentan los microplásticos (partículas menores de 5 mm) dispersos en aguas y sedimentos marinos, ya que son difíciles de identificar y cuantificar con métodos convencionales. Aquí es donde la visión por computadora y el aprendizaje automático han logrado avances **notables**. Recientemente se han entrenado algoritmos de inteligencia artificial para reconocer microplásticos en imágenes y datos espectroscópicos de muestras ambientales. En términos sencillos, estos sistemas “aprenden” a distinguir fragmentos de plástico microscópicos de otras partículas naturales basándose en sus características visuales o químicas. Por ejemplo, se ha desarrollado una técnica que emplea *imágenes hiperespectrales* (fotografías que capturan bandas de luz más allá del visible) junto con algoritmos de clasificación para detectar rápidamente microplásticos en agua de mar (Shan et al., 2019). Asimismo, otros investigadores han utilizado redes neuronales y métodos de *machine learning* para analizar espectros infrarrojos o de Raman generados por muestras de agua/arena, logrando identificar automáticamente partículas de distintos polímeros plásticos en esas muestras (Hufnagl et al., 2019).

RETOS Y LIMITACIONES

La implementación de inteligencia artificial para combatir la contaminación plástica marina enfrenta diversos retos técnicos y operativos. Uno de los principales es el acceso limitado a datos de calidad. Los algoritmos requieren grandes cantidades de información etiqueta-

da para entrenarse adecuadamente, pero en el contexto marino estos datos son escasos, difíciles de recolectar y a menudo están restringidos a zonas costeras o superficiales. Además, la ausencia de estándares unificados de recolección y anotación genera conjuntos de datos heterogéneos que dificultan la interoperabilidad. Para superar esto, se han propuesto estrategias como la generación de datos sintéticos, el uso de campañas de ciencia ciudadana, y la creación de bases de datos colaborativas y estandarizadas a nivel global.

Otro desafío importante es el alto consumo energético de los modelos de IA, especialmente aquellos basados en aprendizaje profundo. Estos algoritmos requieren potentes recursos computacionales tanto para su entrenamiento como para su operación en tiempo real, lo que resulta problemático en entornos marinos donde las plataformas —como drones, boyas o vehículos autónomos— tienen recursos limitados y difícil acceso a energía. Como soluciones, la literatura propone optimizar la eficiencia de los modelos, emplear hardware de bajo consumo, integrar fuentes renovables y aplicar estrategias de gestión inteligente de tareas que reduzcan el uso innecesario de energía.

La implementación de inteligencia artificial (IA) para detectar residuos plásticos marinos enfrenta retos clave que van desde lo técnico hasta lo ético. Uno de ellos es la variabilidad regional del desempeño de los algoritmos: muchos modelos están entrenados con datos de regiones templadas, mientras que zonas tropicales o poco monitoreadas presentan condiciones distintas que pueden afectar la precisión. Por ello, sería útil comparar el rendimiento de los modelos en distintos entornos y ajustar sus parámetros a las características locales (Sustainability Directory, 2025). Otro aspecto crítico es la huella de carbono de la IA. El entrenamiento y uso de modelos complejos consume grandes cantidades de energía, contribuyendo a las emisiones de CO₂. Para hacer estas soluciones más sostenibles, se están desarrollando algoritmos más eficientes y estrategias como el uso de hardware de bajo consumo o energía renovable (UN, 2024). La ciencia ciudadana emerge como una herramienta fundamental para generar datos en zonas con poca infraestructura. Mediante el uso de aplicaciones móviles o plataformas abiertas, comunidades locales pueden capturar imágenes georreferenciadas de resi-

duos plásticos, enriqueciendo los conjuntos de entrenamiento y ayudando a validar las predicciones de los modelos. Esto no solo aporta información útil, sino que también fortalece la participación social y la conciencia ambiental (Saad et al., 2025).

Además, se está explorando la combinación de IA con modelos oceanográficos y climáticos, lo cual permitiría predecir con mayor precisión el transporte y acumulación de plásticos en escenarios de mediano y largo plazo, incluyendo eventos extremos como huracanes o alteraciones en las corrientes marinas (Ryan et al., 2023). Asimismo, muchos expertos coinciden en que es urgente crear una base de datos internacional estandarizada y abierta sobre residuos plásticos marinos. Esta iniciativa enfrentaría obstáculos técnicos (como la unificación de protocolos), legales (relacionados con la propiedad de los datos) y éticos (como asegurar el acceso equitativo y evitar sesgos regionales), pero su desarrollo permitiría una mejor cooperación científica y decisiones más informadas a escala global (Nyadri et al., 2023).

Finalmente, existen limitaciones en la precisión y generalización de los algoritmos. Aunque algunos modelos alcanzan altos niveles de exactitud en entornos controlados, su desempeño en condiciones reales sigue siendo inestable. Esto se debe a la alta variabilidad del plástico (en forma, color y estado de degradación) y a la presencia de elementos naturales que pueden confundirse fácilmente con residuos (como algas o madera). También, muchos modelos no generalizan bien cuando se enfrentan a condiciones distintas a las de su conjunto de entrenamiento. Para mitigar estos problemas, se recomienda ampliar la diversidad de datos de entrenamiento, emplear aprendizaje continuo o transferido, combinar distintos tipos de sensores (ópticos, radar, acústicos), y desarrollar algoritmos híbridos más robustos.

CONCLUSIÓN

La contaminación por plásticos en los océanos representa una crisis ambiental con profundas repercusiones ecológicas, sociales y económicas. La inteligencia artificial (IA) ofrece herramientas eficaces para complementar los esfuerzos humanos, desde la

detección y monitoreo de residuos hasta el análisis automatizado de microplásticos. No obstante, su impacto real depende de integrarla en estrategias más amplias que incluyan políticas públicas, educación ambiental y economía circular. La protección de los océanos exige colaboración entre ciencia, innovación y sociedad, reconociendo que la tecnología, guiada por valores éticos y responsabilidad colectiva, puede convertirse en un aliado clave para restaurar la salud marina y avanzar hacia un futuro sostenible.

Declaración sobre el uso de inteligencia artificial

Para la elaboración de este documento se utilizaron herramientas de inteligencia artificial exclusivamente con el fin de homogeneizar el estilo de redacción y mejorar la corrección gramatical. El contenido, las ideas y el análisis presentados son de autoría original, y la IA no intervino en la generación de datos, resultados o conclusiones.

REFERENCIAS

- UN. (2024). *AI has an environmental problem. Here's what the world can do about that.* <https://www.unep.org/news-and-stories/story/ai-has-environmental-problem-heres-what-world-can-do-about>
- de Vries, R. (2022). *Using AI to Monitor Plastic Density in the Ocean / Updates / The Ocean Cleanup.* <https://theoceancleanup.com/updates/using-artificial-intelligence-to-monitor-plastic-density-in-the-ocean/>
- Deayton, J. (2022). *This AI-enabled robotic boat cleans up harbors and rivers to keep plastic trash out of the ocean - Source Asia.* <https://news.microsoft.com/source/asia/features/this-ai-enabled-robotic-boat-cleans-up-harbors-and-rivers-to-keep-trash-out-of-the-ocean/>
- den Hertog, D., Pauphilet, J., Pham, Y., Sainte-Rose, B., & Song, B. (2024). Optimizing the Path Towards Plastic-Free Oceans. *Operations Research.* <https://doi.org/10.1287/OPRE.2023.0515>
- Ditria, E. M., Buelow, C. A., Gonzalez-Rivero, M., & Connolly, R. M. (2022). Artificial intelligence and automated monitoring for assisting conservation of marine ecosystems: A perspective. *Frontiers in Marine Science, 9*, 918104. <https://doi.org/10.3389/FMARS.2022.918104/XML/NLM>
- Eriksen, M., Lebreton, L. C. M., Carson, H. S., Thiel, M., Moore, C. J., Borerro, J. C., Galgani, F., Ryan, P. G., & Reisser, J. (2014). Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. *PLOS ONE, 9*(12), e111913. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0111913>
- Granado, I., Basurko, O. C., Rubio, A., Ferrer, L., Hernández-González, J., Epelde, I., & Fernandes, J. A. (2019). Beach litter forecasting on the south-eastern coast of the Bay of Biscay: A bayesian networks approach. *Continental Shelf Research, 180*, 14–23. <https://doi.org/10.1016/J.CSR.2019.04.016>
- Griffin, M., Karasik, R., & Takeaways, K. (2022). *Policy Brief Plastic Pollution Policy Country Profile: Mexico.*
- Han, L. Y. (2025). The White Amur and the WasteShark: Hungry machines and circumventive remediations of waste. *Environment and Planning E: Nature and Space.* <https://doi.org/10.1177/25148486241304970>
- Hölzle, I., Somani, M., Ramana, G. V., & Datta, M. (2022). Heavy metals in soil-like material from landfills – Resource or contaminants? *Journal of Cleaner Production, 369*, 133136. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.133136>
- Maharjan, N., Miyazaki, H., Pati, B. M., Dailey, M. N., Shrestha, S., & Nakamura, T. (2022). Detection of River Plastic Using UAV Sensor Data and Deep Learning. *Remote Sensing 2022, Vol. 14, Page 3049, 14*(13), 3049. <https://doi.org/10.3390/RS14133049>
- Ning, J., Pang, S., Arifin, Z., Zhang, Y., Epa, U. P. K., Qu, M., Zhao, J., Zhen, F., Chowdhury, A., Guo, R., Deng, Y., & Zhang, H. (2024). The Diversity of Artificial Intelligence Applications in Marine Pollution: A Systematic Literature Review. *Journal of Marine Science and Engineering 2024, Vol. 12, Page 1181, 12*(7), 1181. <https://doi.org/10.3390/JMSE12071181>
- Nyadjro, E. S., Webster, J. A. B., Boyer, T. P., Cebrian, J., Collazo, L., Kaltenberger, G., Larsen, K., Lau, Y. H., Mickle, P., Toft, T., & Wang, Z. (2023). The NOAA NCEI marine microplastics database. *Scientific Data, 10*(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/S41597-023-02632-Y;SUBJMETA=172,704,829;KWRD=ENVIRONMENTAL+SCIENCES,OCEAN+SCIENCES>
- Ribotti, A., Ning, J., Pang, S., Arifin, Z., Zhang, Y., Epa, U. P. K., Qu, M., Zhao, J., Zhen, F., Chowdhury, A., Guo, R., Deng, Y., & Zhang, H. (2024). The Diversity of Artificial Intelligence Applications in Marine Pollution: A Systematic Literature Review. *Journal of Marine Science and Engineering 2024, Vol. 12, Page 1181, 12*(7), 1181. <https://doi.org/10.3390/JMSE12071181>
- Rußwurm, M., Venkatesa, S. J., & Tuia, D. (2023). Large-scale detection of marine debris in coastal areas with Sentinel-2. *IScience, 26*(12). <https://doi.org/10.1016/J.ISCI.2023.108402/ASSET/29F5C057-B384-4D5A-872BE52744D1380F/MAIN.ASSETS/GR10.JPG>

Ryan, A. C., Allen, D., Allen, S., Maselli, V., LeBlanc, A., Kelleher, L., Krause, S., Walker, T. R., & Cohen, M. (2023). Transport and deposition of ocean-sourced microplastic particles by a North Atlantic hurricane. *Communications Earth and Environment*, 4(1). <https://doi.org/10.1038/S43247-023-01115-7>

Saad, M. R., Abdullah, N. F., Abu-Samah, A., & Nordin, R. (2025). Empowering citizen scientists: A web app for plastic litter classification. *Expert Systems with Applications*, 284, 127776. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2025.127776>

Sustainability Directory. (2025). *The Role of AI in Combating Marine Plastic Pollution → Scenario*. <https://prism.sustainability-directory.com/scenario/the-role-of-ai-in-combatting-marine-plastic-pollution/>

Thushari, G. G. N., & Senevirathna, J. D. M. (2020). Plastic pollution in the marine environment. *Heliyon*, 6(8), e04709. [https://doi.org/10.1016/J.HELION.2020.E04709
](https://doi.org/10.1016/J.HELION.2020.E04709)

Topouzelis, K., Papakonstantinou, A., & Garaba, S. P. (2019). Detection of floating plastics from satellite and unmanned aerial systems (Plastic Litter Project 2018). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 79, 175–183. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.03.011>