

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

Ana Ybeth Flores Angeles<sup>1</sup>, Ricardo Solís Rodríguez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento 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 secretaria 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 (pepena 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, alcoholólisis, pirólisis y aminólisis (Guo et al., 2025). A continuación, se describen brevemente cada una de ellas:

La alcoholólisis consiste en utilizar disolventes, comúnmente alcoholes como el metanol o el isooctanol. 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(hidroxiétilo) (BHETA). 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 temperatura 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-hidroxiétileno) tereftálico (BHETA).

## APLICACIÓN DEL PET DE DESECHO 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

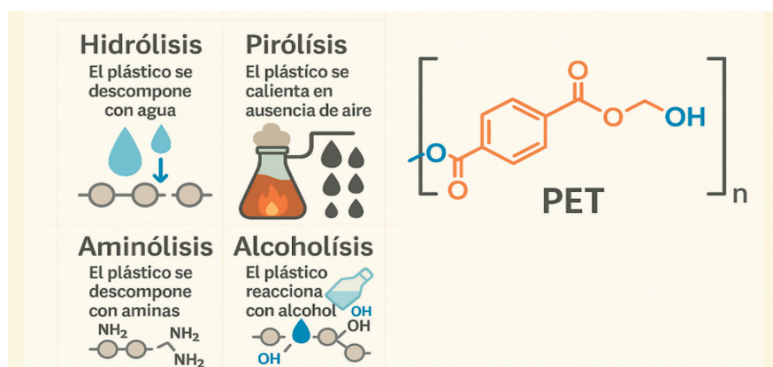
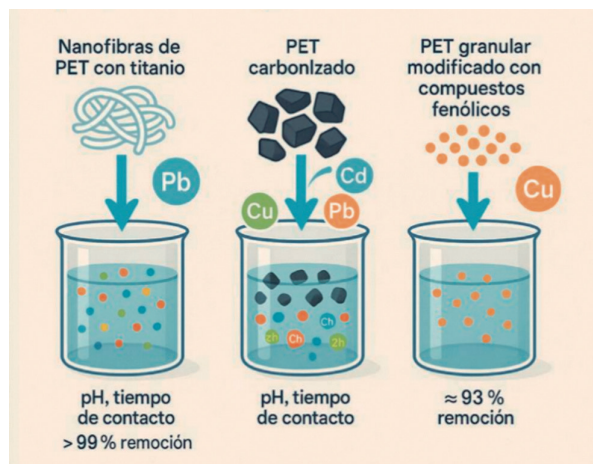


Figura 2. Métodos químicos para la degradación del plástico PET (Recurso IA <https://chatgpt.com/>).

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 hidroxiquinona) 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., & Qahatan, 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<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, and Zn<sup>2+</sup>) 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>