

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

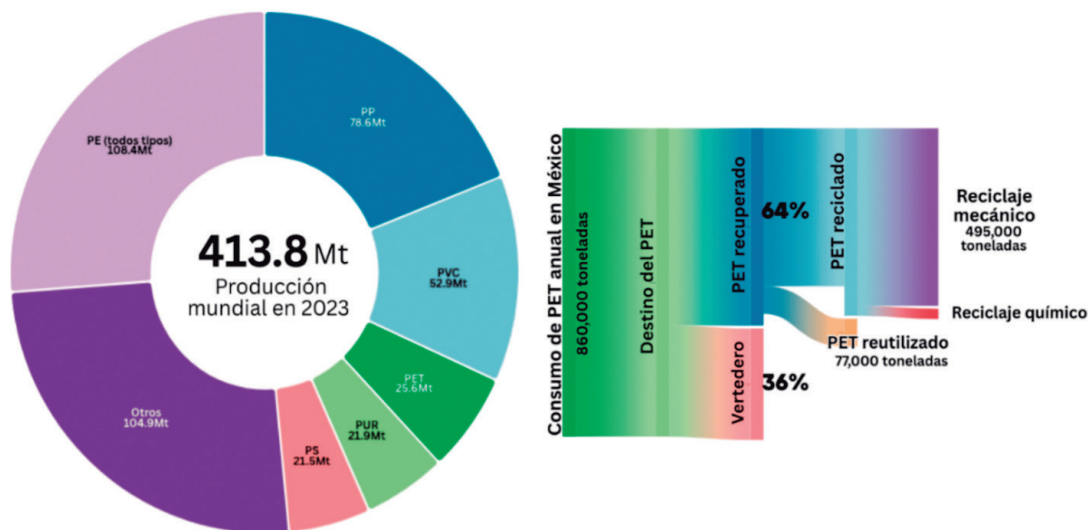


Figura 1. Producción mundial de plásticos y consumo de PET en México en 2023, basado en datos de Plastics Europe y ECOCE.^[2,3]

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 dioles. 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- Triazabicyclodec-5-eno (TBD), dietilenglicol (DEG), ε-caprolactona (CL), hexametildisocianato (HDI), 2-etilhexanoato de estaño (II) (Sn(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 (Poliol_{PET})

- **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 Poli_{PET} (1.4 mmol), se adicionaron 0.28 g de HDI (1.54 mmol), buscando una proporción diol-diiisocianato 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 Poli_{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 espectroscopia 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, Poli_{PET}-2 y Poli_{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)

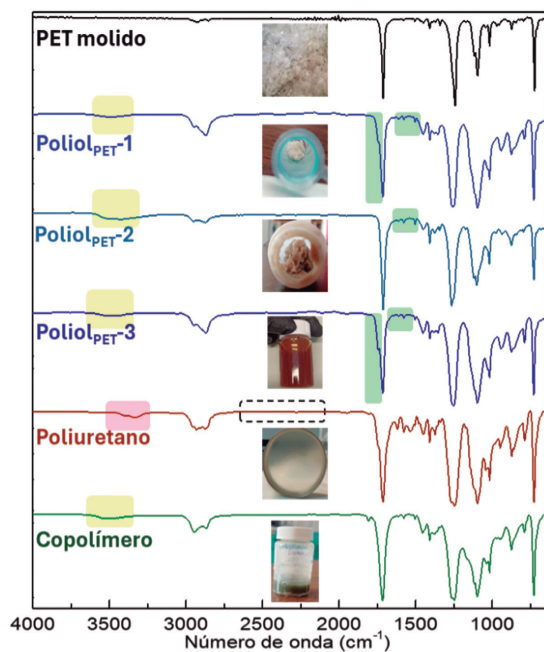


Figura 2. Espectros infrarrojos (FTIR) y fotografías de productos que muestran la transformación química del PET reciclado en polioles mediante tres metodologías, así como el poliuretano y el copolímero.

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 Poli_{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 Poli_{PET}-3 para obtener poliuretano y copolímero

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

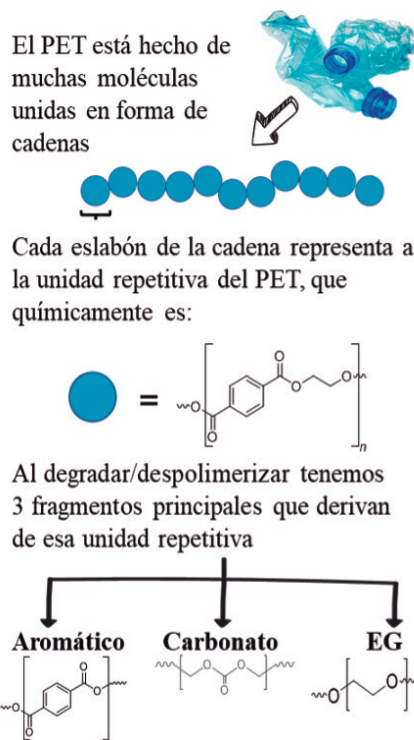


Figura 3. Constitución química del PET y fragmentos presentes al despolimerizarlo.

a nuevas aplicaciones funcionales. En la Figura 4, se ilustra que el Poli_{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 poli_{ol} reciclado. El análisis por FTIR confirmó la aparición de bandas características del enlace uretano (-NH-CO-O-), como la banda ancha de estiramiento N-H (~3300 cm⁻¹) (mostrada en rosa en Figura 2), la señal del estiramiento C=O del grupo uretano (~1700 cm⁻¹) y la desaparición de las señales de isocianato sin reaccionar (~2270 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 poli_{ol} reciclado participó activamente en la reacción.

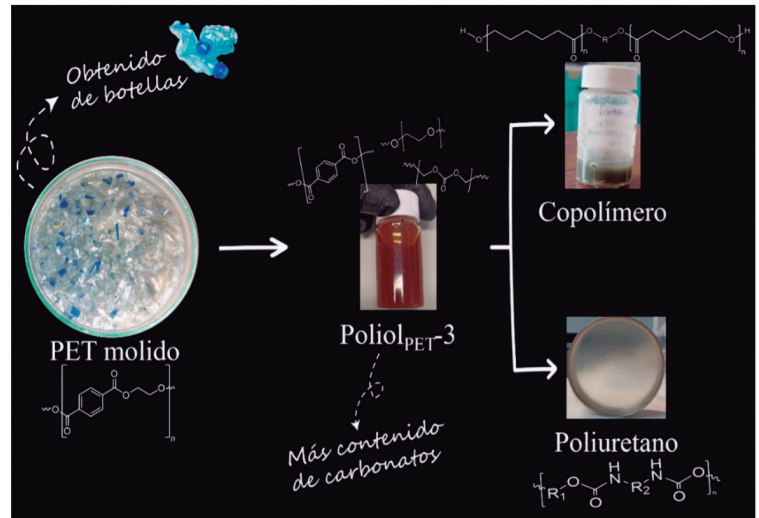


Figura 4. Ruta de transformación de botellas de PET en un poli_{ol} (Poliol_{PET}-3) que puede emplearse para producir copolímeros o poliuretanos, dando lugar a nuevos materiales funcionales a partir de residuos plásticos.

También se exploró la copolimerización del Poli_{ol}-_{PET}-3 con ε-caprolactona (CL) para obtener un copolímero tipo poliéster. En este caso, el Poli_{ol}-_{PET}-3 actúa como iniciador y forma bloques lineales de polica- prolactona (PCL) unidos al poli_{ol}. Se caracterizó mediante FTIR y RMN. En FTIR se observaron las señales típicas de los grupos éster (C=O a ~1720 cm⁻¹, C-O a ~1200 cm⁻¹) y mantiene bandas correspondientes a grupos carbonato del poli_{ol}, 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 polymerizadas (~4.0, ~2.3 y ~1.6 ppm), además de señales del poli_{ol} 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 poli_{oles} 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 Poli_{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., Echeverría-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., Alsewailam, 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., & Cvetinović, 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., Wanasathop, 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/acsbomaterials.2c00808