

## Obtención de poliuretanos a partir de la degradación del PET

Cecilia Angélica Urbina González<sup>1</sup>, Miriam Paola Barrera Nava<sup>1</sup>, Karla A. Barrera-Rivera<sup>1</sup>, Antonio Martínez Richa<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Universidad de Guanajuato, División de Ciencias Naturales y Exactas, Departamento de Química.

[ca.urbinagonzalez@ugto.mx](mailto:ca.urbinagonzalez@ugto.mx)<sup>1</sup>, [mp.barreranava@ugto.mx](mailto:mp.barreranava@ugto.mx)<sup>1</sup>, [fionita@ugto.mx](mailto:fionita@ugto.mx)<sup>1</sup>, [richa@ugto.mx](mailto:richa@ugto.mx)<sup>1</sup>.

### Resumen

El PET (tereftalato de polietileno en español) es un polímero ampliamente utilizado en envases plásticos y presenta una gran oportunidad para ser reciclado y reutilizado en formas de alto valor agregado, la sobreproducción y desecho de este conlleva impactos significativos en el medio ambiente, desde el consumo de recursos no renovables hasta la acumulación de desechos plásticos en los ecosistemas terrestres y acuáticos. En esta investigación nos centramos en la obtención de poliuretano a partir de la degradación del PET, ofreciendo una alternativa prometedora y sostenible para mitigar la contaminación plástica. El proceso de degradación del PET se convierte así en una fuente viable de materias primas para la síntesis de poliuretano (PUs) derivados de la reacción entre un polirol y un diisocianato, que es un material versátil con aplicaciones en diversas industrias.

**Palabras clave:** PET; poliuretano, polioles, películas, caracterización.

### Introducción

La producción y consumo desmesurados de **tereftalato de polietileno (PET)** han generado una preocupación creciente debido a su impacto significativo en el medio ambiente tanto en tierra como en el océano. El PET, ampliamente utilizado en la fabricación de envases y botellas debido a su durabilidad, ligereza y transparencia, ha contribuido de manera notable a la acumulación de residuos plásticos en todo el mundo, sumado a su lenta degradación.

El aumento en la producción global de PET refleja una demanda continua impulsada por diversas industrias, incluyendo alimentos, bebidas y cosmética. Aunque el PET es reciclable, la infraestructura y los sistemas de reciclaje no siempre son adecuados para manejar el volumen abrumador de desechos generados, lo que limita significativamente la efectividad de los esfuerzos de reciclaje [1].

El **reciclaje químico** involucra la transformación de la cadena polimérica, es decir, degradar en unidades monoméricas al polímero (despolimerizar) o romper la cadena al azar en fragmentos más pequeños (escisión). El reciclado químico se lleva a cabo por:

- Solvólisis (por medio de disolventes).
- Pirólisis (por calor)

### **Degradación química del PET por solvólisis.**

El proceso de solvólisis, es decir la degradación empleando disolventes se divide de la siguiente manera:



*Imagen 1. Tipos de degradación química por solvólisis.*

En respuesta a estos desafíos, es crucial explorar **alternativas sostenibles** para reducir la dependencia del PET virgen mediante prácticas de producción más responsables y el fomento de la economía circular. Esto implica no solo mejorar los métodos de reciclaje y gestión de residuos, sino también investigar tecnologías innovadoras para la producción de materiales plásticos que sean **biodegradables** o que utilicen recursos renovables como alternativas viables al PET convencional. Teniendo como una de estas propuestas innovadoras y sostenibles, el uso de polioles de PET.

El proceso comienza con la descomposición del PET reciclado mediante **glicólisis**, donde el material se despolimeriza. Este proceso produce polioles, que son compuestos esenciales para la síntesis de poliuretanos. Los polioles derivados del PET reciclado ofrecen una alternativa viable a los polioles convencionales derivados de recursos no renovables como el petróleo.

Posteriormente, el polirol se hace reaccionar con **diisocianatos** para obtener como producto poliuretanos (PUs), los cuales tienen diversas aplicaciones en el ámbito industrial.

### **Obtención de polirol por medio de reciclaje químico: glicólisis.**

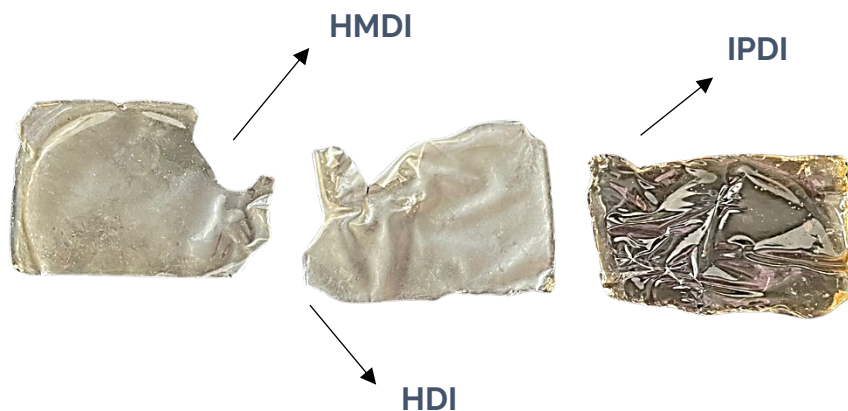
El método implementado consiste en la depolimerización por glicólisis del PET utilizando etilencarbonato (EC) como reactivo en exceso en presencia de un catalizador específico (carbonato de cesio), lo que descompone el PET en oligómeros de pesos moleculares entre 800 y 1400 g/mol. Una reacción típica se realiza en un matraz de fondo redondo de 250 ml, donde se añaden 15 g de PET limpio y molido, 45 g de EC y 5% en peso del catalizador, los cuales se hacen reaccionar por 18 horas a 150° en agitación constante.



*Imagen 2. Polirol de PET obtenido.*

### **Síntesis de poliuretanos.**

En este trabajo, los poliuretanos (PUs) se sintetizaron utilizando tres diferentes diisocianatos: **hexametildiisocianato (HDI)**, **hexametildiisocianato ciclotetramérico (HMDI)** e **isoforondiisocianato (IPDI)**. La síntesis se realiza en un matraz de fondo redondo de 25 ml, donde se añade el polirol, diisocianato en proporción molar 1:1:14 (con un exceso de diisocianato) y 3 mg de octoato de estaño como catalizador, empleando dicloroetano como disolvente. Se hace la reacción en 3 horas a 80° en agitación constante. Posteriormente se deja en agitación 21 horas más a temperatura ambiente y se obtiene una película por casting.



*Imagen 3. Películas de PU obtenidas con diversos diisocianatos.*

### Caracterización.

**RMN:** Se realizó en un equipo Varian Inova 400 MHz (400 MHz para  $^1\text{H}$  and 100 MHz para  $^{13}\text{C}$ ) a t.a.  $\text{CDCl}_3$  fue usado como disolvente para los polioles y  $\text{DMSO-d}_6$  para los poliuretanos, y todos los espectros se referenciaron al solvente residual,  $\text{CDCl}_3$  [ $\delta$  (ppm) 7.26 ( $^1\text{H}$ ) y 77.0 ( $^{13}\text{C}$ )] y  $\text{DMSO-d}_6$  [ $\delta$  (ppm) 2.50 ( $^1\text{H}$ ) y 39.52

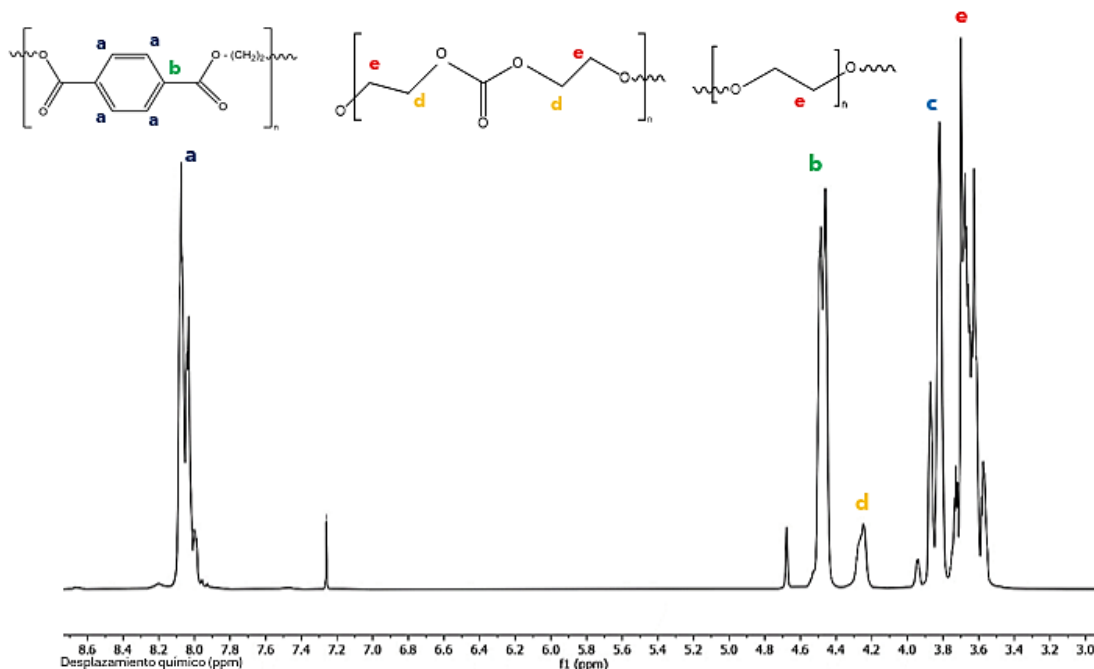


Imagen 4. RMN- $^1\text{H}$  del poliol de PET

( $^{13}\text{C}$ ).

**FT-IR:** Para los polioles y las películas de PU se obtuvieron los espectros en el IR con un accesorio de reflexión total atenuada (ATR) en un espectrómetro Perkin-Elmer Spectrum One FT-IR, en el rango de 4000 a 650  $\text{cm}^{-1}$ . Las propiedades mecánicas se medirán en una máquina Instron con una celda de carga de 100 N. Usando la forma de mancuerna Tipo 4 y velocidad de 5 mm/min, evaluando al menos 5 piezas de cada PU.

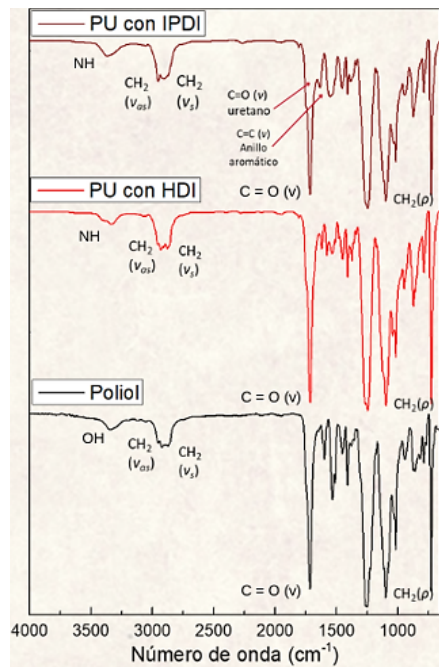


Imagen 5. FT-IR Polirol, PU con IPDI y HDI como diisocianato.

## Aplicaciones

### 01 Recubrimientos y pinturas

Son ampliamente utilizados por su resistencia a la abrasión, a los productos químicos y a la intemperie. Ofrecen una excelente protección para superficies expuestas a condiciones ambientales adversas, como edificios, puentes, y equipos industriales.



### 02 Adhesivos

Los adhesivos basados en poliuretano son conocidos por su fuerte adhesión a una amplia variedad de sustratos, incluyendo metales, plásticos y maderas.



### 06

#### Membranas

Por su capacidad para formar películas delgadas con poros controlados que permiten la separación eficiente de contaminantes, incluyendo partículas, microorganismos, entre otros.



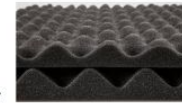
## APLICACIONES POTENCIALES

Los poliuretanos obtenidos utilizando polirol obtenido a partir de PET y diversos diisocianatos encuentran aplicaciones diversas y significativas en varias industrias gracias a sus propiedades únicas y versátiles.

### 03

#### Espumas

Usadas en la fabricación de colchones, muebles, embalajes y aislamientos. Pueden producir tanto espumas flexibles, que ofrecen confort y amortiguación, como espumas rígidas, que proporcionan aislamiento y resistencia estructural.



### 05 Moldes y encapsulados

Ideales para aplicaciones donde se requiere precisión y resistencia mecánica, como en la fabricación de piezas industriales y componentes electrónicos.



### 04 Selladores y juntas

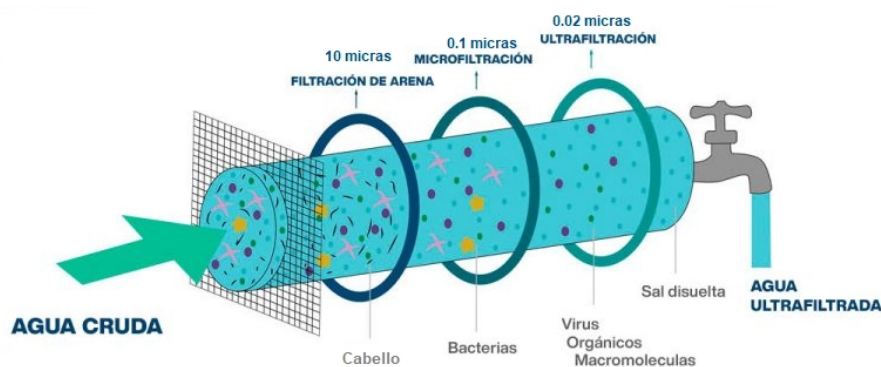
Proporcionan estanqueidad y resistencia a la intemperie en aplicaciones como construcción, automotriz y electrónica. Permitiría la formulación de selladores que duraderos y flexibles, adaptándose a diferentes tipos de superficies y condiciones ambientales.



## Membranas para ultrafiltración:

Se probó la posible aplicación de los materiales sintetizados en la producción de membranas, se obtuvieron en el laboratorio membranas mediante técnica de inmersión de fase para su uso en **ultrafiltración**, esto en base a su capacidad para formar películas delgadas con poros controlados que permiten la separación eficiente de contaminantes.

Los módulos de ultrafiltración ofrecen una capacidad de separación macromolecular de partículas de un tamaño aproximado de 20-1000 Å (hasta 0,1 micras). Las sales disueltas, así como las moléculas de tamaño inferior, atraviesan la membrana, mientras que coloides, proteínas, contaminantes biológicos y moléculas de gran tamaño son retenidas. La mayoría de las membranas de ultrafiltración tienen un tamaño de corte molecular de entre 1000 y 100 000 Dalton. La presión transmembrana en las membranas de ultrafiltración es normalmente de entre 1 a 7 bar (15 a 100 psi).



*Imagen 6. Proceso de ultrafiltración.*

**Técnica de inmersión de fase:** Se preparó una solución homogénea a partir de los poliuretanos sintetizados y un disolvente (Dimetilformamida), obteniéndose una fina película sobre una placa de vidrio circular. Posteriormente, la película es sumergida en baño de agua 12 horas a temperatura ambiente. En este proceso, el no- solvente (agua) es absorbido por la solución, causando una separación de fase en toda la longitud de la película formando la estructura y porosidad de la membrana.



*Imagen 7. Membrana de poliuretano.*

## Conclusiones

El desarrollo de este proyecto no solo busca avanzar en la tecnología de reciclaje de plásticos, sino también contribuir al desarrollo de soluciones sostenibles que promuevan la economía circular y reduzcan el impacto ambiental negativo de los desechos plásticos. Al integrar conocimientos de química de polímeros con prácticas de ingeniería de materiales, se espera establecer un proceso viable y eficiente tanto desde el punto de vista económico como ambiental.

La versatilidad de los poliuretanos derivados de polioliol de PET y diisocianatos como HDI, IPDI y HMDI los convierte en materiales aplicables en diversas áreas industriales y comerciales. Su capacidad para combinar propiedades mecánicas robustas con resistencia química y durabilidad los hace ideales para enfrentar los desafíos de diseño y rendimiento en una amplia gama de sectores industriales. Además, el uso de polioliol de PET reciclado en la producción de poliuretanos no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental al cerrar el ciclo de vida del plástico, sino que también abre nuevas oportunidades para innovaciones en materiales más ecológicos y eficientes.

## Bibliografía/Referencias

- [1]. Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). *Production, use, and fate of all plastics ever made*. *Science Advances*, 3(7), e1700782.
- [2]. Romanelli, S. M., Alvarez, V. A., & Aguirre, M. E. (2013). *Polymers from PET waste and CO<sub>2</sub>*. *Chemical Engineering Transactions*, 32, 631-636. (Relevante para la utilización de PET reciclado en la producción de polímeros).
- [3]. John, M. J., & Thomas, S. (2008). *Biofibres and biocomposites*. *Carbohydrate Polymers*, 71, 343-364. (Explora aplicaciones de biocomposites que pueden ser relevantes para el desarrollo de materiales a partir de PET reciclado).
- [4]. Datta, J., & Bhattacharya, M. (2015). *Polyurethane Adhesives Based on Recycled PET Polyol*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 60, 32-39. doi:10.1016/j.ijadhadh.2015.03.003
- [5]. Romanelli, S. M., Alvarez, V. A., & Aguirre, M. E. (2013). *Synthesis and Characterization of Polyurethane Foams from PET Waste*. *Chemical Engineering Transactions*, 32, 631-636.
- [6]. Tawari, A. N., Majumdar, A., & Bhattacharya, M. (2013). *Polyurethanes based on glycolysis of recycled PET*. *Journal of Applied Polymer Science*, 130(2), 1234-1241. doi:10.1002/app.39217
- [7]. Datta, J., & Bhattacharya, M. (2016). *PET-Based Polyurethane Elastomers for Molded Applications*. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 55(13), 1355-1365. doi:10.1080/03602559.2015.1111907
- [8]. M. D. de Dios Caputto, R. Navarro, J. L. Valentin, A. Marcos-Fernández, J. *Polym. Sci.* 2022, 60(24), 3269. <https://doi.org/10.1002/pol.20220137>
- [9]. Interagua. (n.d.). *¿Qué es la ultrafiltración?* <https://interagua.mx/blog/que-es-la-ultrafiltracion/>
- [10]. *Preparación de membranas para producción de agua potable*. (2007). *Información Tecnológica*, 18(5790).