

Evaluación de la despolimerización quimiolítica del PET como método alternativo de reciclaje

Evaluation of PET chemolytic depolymerization as an alternative recycling method

Uriel Arredondo Gutiérrez¹, Mauricio Aguilar Ramirez¹, María Fernanda Meza Enríquez¹, Astrid Yunuen Lorelai Jaime Villanueva¹, Carlos Felipe Villafan Parra¹, Zaira Jelena Mosqueda Huerta², José Manuel Riesco Ávila¹.

¹Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca - División de Ingenierías.

²Universidad de Guanajuato, Campus Guanajuato - División de Ciencias Naturales y Exactas.
riesco@ugto.mx.

Resumen

Uno de los plásticos que más problemas generan, no sólo por el volumen que ocupa, sino por la dificultad para reciclarlo, es el polietileno tereftalato (PET). Durante el reciclaje químico a altas temperaturas, produce ácido tereftálico y ácido benzoico, los cuales generan problemas de corrosión y bloqueo de tuberías, constituyendo un riesgo de seguridad. Una de las maneras de solventar esta problemática es empleando catalizadores que no sólo incrementan el costo del proceso de reciclaje, sino que generan nuevos residuos que deben ser tratados antes de disponer de ellos. El reciclaje químico del PET es una alternativa para el tratamiento del mismo, y consiste en la despolimerización de las largas cadenas poliméricas en compuestos más pequeños, incluyendo la separación y degradación de los ácidos tereftálico y benzoico. Como alternativa al empleo de glicoles, bases, ácidos y/o solventes comerciales, este estudio propone el empleo de un destilado de baja temperatura derivado de la pirólisis del poliestireno, el cual, por sus características fisicoquímicas, se comporta como solvente en un ambiente reductor. El uso de este destilado impactaría significativamente en los procesos del aprovechamiento de residuos, ya que, al ser derivado de otro proceso de reciclaje, reduciría considerablemente los costos operativos globales.

Palabras clave: PET, polímeros, poliestireno, reciclaje, residuos.

Introducción

La industria del plástico, desde sus orígenes, nació como una solución ecológicamente amigable para reemplazar recursos que eran escasos y no sostenibles, como el carey, el marfil y los huesos de animales, empleados en un sin número de productos de uso común, ocio y lujo. Actualmente, el uso de plásticos está presente en cada aspecto de la vida cotidiana y constituye uno de los elementos principales que garantiza la higiene y seguridad de las industrias médica y alimentaria, e incluso, gracias a la economía circular y un uso eficiente de los mismos, contribuye al ahorro de energía, agua y a mitigar las emisiones de CO₂.

Sin embargo, gracias a esta versatilidad la humanidad ha desarrollado una dependencia plástica que se incrementa a la par que lo hace la población mundial, consumiendo, al 2020, poco más de 360 millones de toneladas anuales, de las cuales, México produce el 2% (Plastics Atlas , 2021) (Statista Online, s.f.). El problema radica en que el desarrollo de infraestructura para la disposición y tratamiento de los residuos generados no ha ido a la par que el crecimiento poblacional y la demanda plástica, lo que contribuye a la acumulación de éstos en vertederos o inclusive, en los diversos cuerpos acuáticos.

La necesidad de solucionar los problemas de disposición y manejo de residuos, y de solventar una potencial crisis energética, ha estimulado que, en los últimos años, numerosas investigaciones se enfoquen en el desarrollo de nuevas tecnologías de reciclaje químico que permitan utilizar materiales de desecho, como los plásticos, como fuente de energía o materia prima para la producción de compuestos químicos de interés comercial. Uno de los plásticos que más problemas generan, no sólo por el volumen que ocupa, sino por la dificultad para reciclarlo, es el polietileno tereftalato (PET). Durante el reciclaje químico a altas temperaturas, como la pirólisis, produce ácido tereftálico y ácido benzoico, los cuales generan problemas de corrosión y bloqueo de tuberías, constituyendo un riesgo de seguridad. Una de las maneras de solventar esta problemática es empleando catalizadores que no sólo incrementan el costo del proceso de reciclaje, sino que generan nuevos residuos que deben ser tratados antes de disponer de ellos.

Entre las primeras técnicas que se emplearon para el reciclaje químico del PET está la quimiólisis, que es la despolimerización de las largas cadenas poliméricas, en oligómeros y monómeros, empleando diversos compuestos químicos. Esta técnica incluye 3 métodos principales, cuyo nombre y mecanismo de reacción depende de la molécula empleada que incluya el grupo hidroxilo, principal agente oxidante en este proceso químico (Carta, Cao, & D'Angeli, 2003) (Elamri, Zdiri, Harzallah, & Lallam, 2017). La despolimerización del PET por estos métodos es posible porque químicamente es un poliéster con grupos éster funcionales que pueden ser separados por agua, alcoholes, ácidos, glicoles, e incluso, aminas, como lo han demostrado diversos autores (Carta, Cao, & D'Angeli, 2003)- (Xanthos & Patel, 1998). El problema, nuevamente, radica en que la mayoría de los estudios involucran ácidos fuertes o solventes peligrosos (que requieren manejos especiales) o bien, el empleo de altas temperaturas, lo cual incrementa los costos operativos del reciclaje.

Como alternativa al empleo de ácidos y/o solventes comerciales, este estudio propone el empleo de un destilado de baja temperatura derivado de la pirólisis del poliestireno, el cual, por sus características fisicoquímicas, se comporta como solvente en un ambiente reductor. El uso de este destilado, impactaría significativamente en los procesos del aprovechamiento de residuos, ya que, al ser derivado, a su vez, de otro proceso de reciclaje, reduciría considerablemente los costos operativos globales.

Conceptos básicos

a) Polímeros.

Conjunto de moléculas más simples que se llaman monómeros. En el caso del polietileno, el monómero con el que se inicia se llama etileno y tras un proceso de polimerización, se tiene N veces esta molécula. Dentro de los polímeros existen más clasificaciones, el grupo de interés en este caso son los poliésteres, dado que el politereftalato de etileno o polietileno de tereftalato (PET), entra en esta clasificación. El grupo éster es lo que diferencia a estos polímeros de los otros plásticos, lo que favorece una ruptura de la cadena al ser hidrolizado (Pulido, Habboub, Aristizabal, Szekely, & Nunes, 2009).

b) Polietileno tereftalato.

El polietileno tereftalato (PET) es un importante poliéster termoplástico, utilizado en diferentes aplicaciones, principalmente en la industria alimentaria, ya que es el principal constituyente de los envases de productos de primera necesidad, además de utilizarse en forma de fibras, láminas y películas (Carta, Cao, & D'Angeli, 2003). Actualmente, uno de los principales problemas ambientales es derivado por la gran cantidad acumulada de botellas de este plástico, así como de otros productos, ya que, a pesar de no ser un material nocivo, poseen gran resistencia a la degradación en condiciones ambientales (Elgegren Lituma & Nakamatsu Kuniyoshi, 2009). La versatilidad del PET se debe a sus diversas propiedades, tales como ligereza, durabilidad y resistencia química (Palmay Paredes, Alvarado Guilcapi, & Sánchez Rojas, 2022). Algunas de las propiedades fisicoquímicas se enlistan en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades del PET (Universidad de Barcelona, s.f.).

Propiedad	Valor
Densidad	1.29 - 1.4 g/cm ³
Temperatura de transición vítrea	67.9 - 79.9 °C
Temperatura de fusión	212 - 265 °C
Capacidad calorífica específica a Tamb	1.42 x10 ³ - 1.47 x10 ³ J/kg·K
Índice de refracción	1.57 - 1.58
Dureza	17 - 18.7 HV

c) Reciclaje químico del PET.

El reciclaje químico de residuos del PET se realiza con productos químicos específicos que provoquen la ruptura de las cadenas largas poliméricas, generando diversos productos que dependen del agente químico utilizado. Sin embargo, en la mayoría de los métodos, dichos productos son: Bis2-hidroxietil tereftalato (BHET), ácido tereftálico (TPA), tereftalato de dimetilo (DMT), ácido benzoico y etilenglicol (Elgegren Lituma & Nakamatsu Kuniyoshi, 2009)- (Barnard, Arias, & Thielemans, 2021).

De acuerdo con la literatura, se ha demostrado que la reacción sin la presencia de un catalizador es una reacción que puede durar hasta 8 horas requiriendo una energía de activación de 32 kcal/mol, es así que el uso de catalizadores es primordial y ampliamente recomendado, mismos que disminuyen la energía de activación a 19 kcal/mol, obteniéndose una despolimerización casi completa y teniendo en cuenta los catalizadores de transesterificación más afines a la reacción. La reacción de glucólisis del PET es una reacción reversible, siguiendo el mecanismo de reacción donde los enlaces éster del PET se rompen y reemplazan con terminales hidroxilo (Palmay Paredes, Alvarado Guilcapi, & Sánchez Rojas, 2022).

Sin embargo, como alternativa al uso de catalizadores, otras técnicas de despolimerización quimiolítica se han desarrollado y cuyos nombres varían acorde al disolvente utilizado, tal y como se indican a continuación (Barnard, Arias, & Thielemans, 2021):

I. Metanólisis: Metanol.

II. Glicólisis: Etilenglicol.

Una de las técnicas de reciclaje químico que sigue con los principios del desarrollo sostenible evitando la utilización de ácidos y álcalis fuertes es la glucólisis de PET (Pulido, Habboub, Aristizabal, Szekely, & Nunes, 2009). La glicólisis se da cuando PET entra en contacto con EG en un amplio rango de temperaturas (453-523 K) durante un período de tiempo de 0.5-8 horas. El principal producto de la glucólisis por EG es el monómero de PET, bis(hidroxietil) tereftalato (BHET), que puede polimerizarse después de la purificación para producir nuevamente PET (Elgegren Lituma & Nakamatsu Kuniyoshi, 2009). La mayoría de los estudios sobre el reciclaje químico de PET por glucólisis están relacionados con aplicaciones de productos glicolizados para producir polioles para poliéster insaturado o poliuretano (Carta, Cao, & D'Angeli, 2003).

III. Hidrólisis: Ácidos y álcalis.

La hidrólisis neutra se realiza típicamente en contacto con residuos de PET con agua o vapor a una presión de 1-4 MPa y temperaturas de 473-573 K. Los principales productos formados son etilenglicol (EG) y ácido tereftálico (TPA). El TPA se separa de la mezcla posterior a la reacción por filtración, mientras que un volumen sustancial de EG diluido se recupera mediante extracción o destilación (Carta, Cao, & D'Angeli, 2003). Por otro lado, al emplearse ácidos se convierte en hidrólisis ácida; mientras que al utilizar bases, se convierte en hidrólisis ácida (Barnard, Arias, & Thielemans, 2021).

IV. Aminólisis: Aminas y poliaminas y

V. Amonólisis: Amoníaco

Materiales y métodos

Materia prima

Se recolectaron caretas protectoras del mismo tamaño y color, de la marca PTM Advanced Plastic Solutions®, proporcionadas por el Sector Salud de Guanajuato (México), remanentes de los insumos requeridos durante la pandemia de Covid-19.

Preparación del PET para los tratamientos: se recortaron y trituraron las caretas en hojuelas cuadradas de 0.5 x 0.5 mm, y de 2 x 2 cm.

Técnicas de despolimerización

Para realizar el reciclaje químico del PET, mediante la despolimerización quimiolítica, se utilizaron como medios de reacción (Figura 1): etilenglicol (EG) para una glicólisis, hidróxido de sodio para una hidrólisis básica, y un destilado de baja temperatura de la pirólisis del poliestireno (EPS) para una solvólisis comparativa.

El procedimiento general de los tratamientos es el siguiente:

1. Colocar 10 g de hojuelas de PET en 100 mL de medio de reacción. Relación 1:10.
2. Establecer las condiciones de reacción. Para cada medio de reacción se empleó un rango de temperatura diferente, considerando los puntos de ebullición de cada solvente y la literatura (Figura 1). El tiempo de reacción de reacción, independiente de la temperatura y para cada tratamiento fue de 200 min, con agitación constante entre 200-250 rpm.
3. Observar cambios físicos durante el tiempo de reacción. Una vez transcurridos los 200 min se dejan enfriar completamente las hojuelas de PET y los sobrenadantes.
4. Lavar las hojuelas de PET para eliminar residuos de medio de reacción. Con el objetivo de observar el comportamiento de los productos, las hojuelas se dividieron en tres grupos, dejando un grupo control y realizándole lavados con metanol, y etanol, a los otros dos grupos.
5. Dejar secar completamente a temperatura ambiente en la campana de extracción.
6. Caracterizar los productos y sobrenadantes.

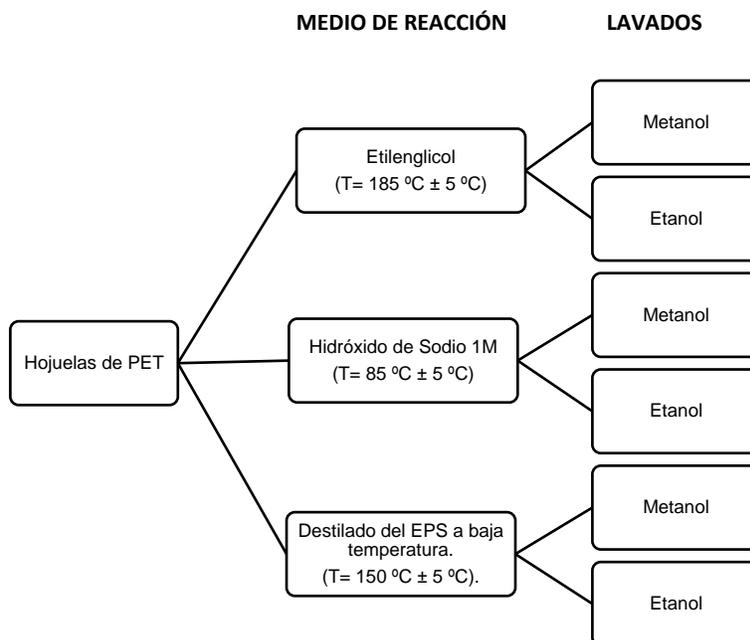


Figura 1. Tratamientos de despolimerización del PET.

Titulación ácido-base.

Se realizaron titulaciones ácido-base de los sobrenadantes obtenidos, considerándolos como soluciones ácidas, y utilizando hidróxido de potasio como agente básico, así como fenolftaleína como indicador colorimétrico del punto de viraje (indica neutralización de la reacción entre los dos compuestos). La fenolftaleína, en una solución básica es ligeramente rosa, e incolora en una solución ácida. Si los medios de reacción demuestran un comportamiento ácido, significa una gran presencia de grupos carboxílicos (-COOH) que, particularmente en la degradación del PET, indican la despolimerización de las largas cadenas del PET (polímero) en monómeros (unidades de un solo compuesto), tales como el ácido tereftálico y el ácido benzoico, así como en etilenglicol (Figura 2).

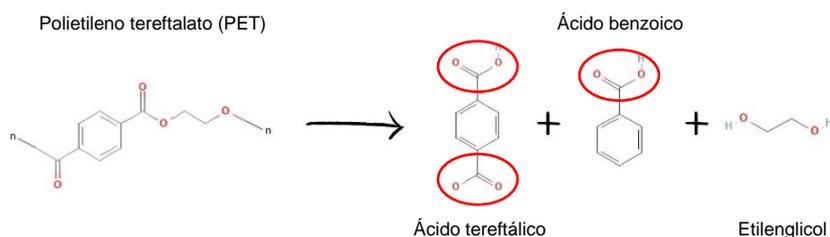


Figura 2. Esquema general de la despolimerización del PET (en círculo rojo se encuentran los grupos carboxilo).

Análisis de dureza.

La degradación parcial de las largas cadenas poliméricas del PET tiene un impacto en sus propiedades mecánicas, como la dureza, por lo que analizar el cambio de esta propiedad en las diferentes muestras, sirve como indicador de la degradación.

Se utilizó un analizador de dureza micro-Vickers de la marca Sinowon®, empleando 0.98 N como carga de análisis.

Espectroscopía UV-VIS.

La espectroscopía es una técnica analítica empleada para detectar los grupos funcionales de un compuesto, dependiendo de la absorción o emisión de radiación electromagnética de la muestra a analizar. En el caso de los plásticos, aunque la espectroscopía de infrarrojo (IR) es la más utilizada (Universidad de Barcelona, s.f.) (SUASNAVAS FLORES, 2017), la espectroscopía de ultravioleta-visible (UV-VIS), ha resultado también ser de suma utilidad, sobre todo cuando se analizan los grupos funcionales pequeños cuya transición energética se da en una longitud de onda de 180 y 290 nm (Fernández, 2015).

Tal es el caso del grupo carbonilo (C=O), presente en aldehídos, cetonas, ésteres, ácidos carboxílicos y amidas. Para la presente investigación, particularmente, es de suma importancia detectar la presencia de grupos carboxilos (-COOH), los cuales son observables a partir de una longitud de onda de 205 nm (Fernández, 2015).

Con el objetivo de verificar la presencia de grupos carboxilo en los medios de reacción (etilenglicol, hidróxido de sodio y destilado del EPS) y en los productos sólidos, se hizo un barrido de absorción entre los 100 y 1000 nm, en un espectrofotómetro UV-VIS Ocean Optics®, con lámparas de halógeno y deuterio, empleando celdas de cuarzo como contenedor de las muestras líquidas.

Observación al microscopio.

Los cambios químicos de un material normalmente conllevan cambios físicos. Estos últimos, incluso, pueden ser fácilmente observables y sirven para monitorear el comportamiento de la muestra en el medio de reacción, y así ajustar procedimientos. Se utilizó un microscopio Mitutoyo® con Moticam 1080, con una magnificación de 15X.

Resultados y discusión

Siguiendo la metodología general descrita en el apartado anterior, y después del tiempo de reacción correspondiente, las hojuelas de PET se dividieron en tres grupos: control, lavado con metanol, y lavado con etanol.

En este punto se observó que había unas hojuelas más transparentes que otras, cuya diferencia quedó evidenciada por las reacciones a las que se sometieron. La diferencia es tan sutil que es difícil apreciarla, pero sirvió de punto de comparación para pruebas posteriores, denominándolos PET blanco (es más transparente a contraluz o menos opaco en fondo negro) y PET gris, sólo para fines de identificación (Figura 3).

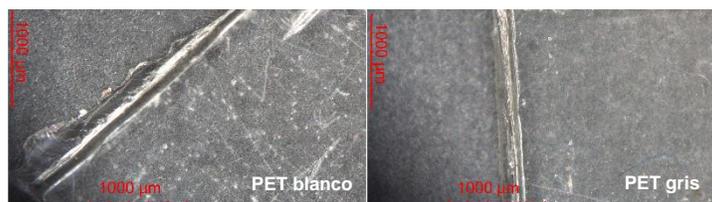


Figura 4. PET blanco y PET gris (magnificación 15X en microscopio Mitutoyo® con Moticam 1080).

Titulación ácido-base.

Una vez retiradas las hojuelas de PET de los medios de reacción, 20 mL de los sobrenadantes (de etilenglicol, hidróxido de sodio y destilado del EPS) se utilizaron para realizar las titulaciones ácido-base. Como indicador se utilizó fenolftaleína al 1% y como agente de titulación básico, el hidróxido de potasio (KOH) 1M, ya que se hipotetizó que los medios de reacción se habían acidificado como producto de la degradación del PET.

Tanto el sobrenadante base etilenglicol, como el sobrenadante base destilado del EPS, tuvieron un punto de viraje con menos de 1 mL de agente básico (KOH 1M), confirmando que dicho medio de reacción se tornó ácido. Sin embargo, el sobrenadante base hidróxido de sodio, consumió poco más de 10 mL de agente básico sin llegar al punto de viraje, indicando que el medio de reacción seguía siendo básico.

Para comprobar esto último se preparó una solución de ácido clorhídrico (HCl) 1M como agente de titulación ácido. Se requirieron cerca de 5 mL de HCl 1M para alcanzar el punto de vire en el sobrenadante base hidróxido de sodio, confirmando la basicidad de este medio de reacción.

Estos resultados permitieron obtener la concentración molar de las tres diferentes soluciones desconocidas (Tabla 2), considerando la siguiente ecuación:

$$M_a \cdot V_a = M_b \cdot V_b \quad (1)$$

Donde:

M_a → Concentración molar de la solución desconocida (el sobrenadante).

V_a → Volumen empleado de la solución desconocida (el sobrenadante).

M_b → Concentración molar de la solución conocida (KOH o HCl, según corresponda).

V_b → Volumen empleado de la solución conocida para alcanzar el punto de viraje (KOH o HCl, según corresponda).

Tabla 2. Concentración molar de los diferentes medios de reacción (sobrenadantes).

Sobrenadante	Concentración molar
Base Etilenglicol	0.0425 M
Base Hidróxido de sodio	0.245 M
Base Destilado del EPS	0.0075 M

La concentración molar o molaridad es el número de moles de soluto en un litro de disolvente, por lo que los resultados obtenidos sirven para hipotetizar el comportamiento de los medios de reacción y seleccionar un método para la determinación del "número ácido", que es un índice de la presencia de ciertos tipos de ácidos en una solución problema. De acuerdo con estos resultados, además de realizar una curva de neutralización, los métodos que podrían ser de utilidad para determinar el "número ácido", son las normas ASTM-D974-2014 y ASTM-D8031-16.

Análisis de dureza.

Se realizaron pruebas de dureza micro-Vickers (HV) a las hojuelas de PET sometidas a los diferentes tratamientos (Figura 5), considerando medios de reacción o solvente (etilenglicol, hidróxido de sodio y destilado de EPS), lavados (metanol y etanol), y el color del PET (blanco y gris).

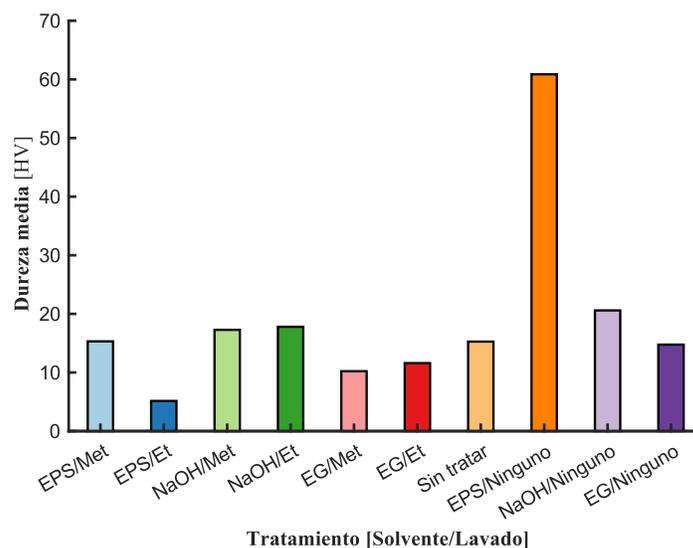


Figura 5. Comparación del comportamiento de la dureza entre tratamientos.

La dureza de las hojuelas de PET utilizado sin ningún tratamiento, corresponde a 15.27 HV, un valor muy cercano al rango de 17 y 18.7 HV (Tabla 1). Es importante resaltar que, incluso entre el mismo proveedor, la dureza y otras propiedades varían ligeramente dependiendo de las condiciones de manufactura.

Relativamente cercana a estos valores se encuentra la dureza de las hojuelas obtenidas de los siguientes tratamientos: destilado del EPS lavado con etanol; hidróxido de sodio sin lavado, y con ambos lavados; y etilenglicol sin lavado.

Sin embargo, al observar las barras de los tratamientos de EPS sin lavar y lavado con etanol, se observa que están muy por encima y debajo de los valores promedio, respectivamente. Este comportamiento probablemente tiene que ver con la capa viscosa que se genera sobre las hojuelas al retirarlas del medio de reacción y que se puede observar fácilmente en la Figura 15. Con base en ello y en lo observado en la Figura 5, se puede concluir que los lavados con etanol remueven satisfactoriamente dicha capa.

Por otro lado, al observar el grupo de los tratamientos con hidróxido de sodio, no existe una diferencia significativa entre uno y otro; y el etilenglicol por sí solo no tiene un efecto notorio sobre la dureza, mientras que los lavados alcohólicos si la disminuyen ligeramente. Esto está en concordancia con lo que se observa Figura 13, pues, visualmente, no hay mucha diferencia entre una hojuela y otra.

Con base en esos resultados se realizó un análisis de varianza, descrito en la siguiente tabla:

Tabla 3. Análisis de varianza, considerando el color del PET.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Solvente	3	1927.22	642.41	6.49	0.002
Lavado	2	2021.87	1010.94	10.21	0.000
Color	2	270.81	135.40	1.37	0.270
Error	31	3069.47	99.02	-	-
Falta de ajuste	7	3009.07	429.87	170.81	0.000
Error puro	24	60.40	2.52	-	-
Total	38	6445.88	-	-	-

De este análisis de varianza (ANOVA) se deduce que los únicos dos factores que tienen significancia estadística son el tipo de solvente (medio de reacción) utilizado y el lavado, como se observa en las Figuras 6 y 7.

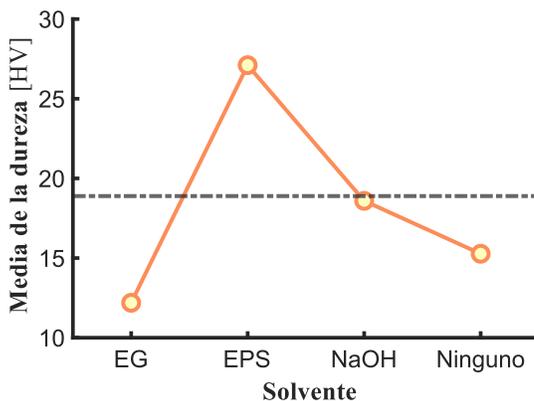


Figura 6. Media de la dureza vs solvente utilizado (medio de reacción).

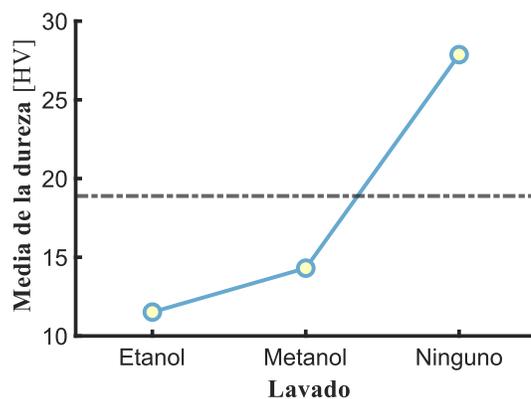


Figura 7. Media de la dureza vs tipo de lavado.

Aparentemente, de acuerdo con la Figura 6, los tratamientos con destilado del EPS incrementan la dureza, pero como se mencionó anteriormente, esto puede estar directamente relacionado con la capa viscosa que se forma post-tratamiento. De dicha gráfica se rescata que el hidróxido de sodio no tiene un efecto significativo en la dureza, cosa que, por otro lado, sí logra hacer el etilenglicol. En cuanto a lo observado en la Figura 7, se deduce que el lavado con etanol es el que más afecta la dureza del material, entendiéndose con ello que, en efecto, el lavado es efectivo.

Espectroscopía UV-VIS.

Se analizaron los tres medios de reacción (etilenglicol, hidróxido de sodio y destilado del EPS), incluyendo los lavados (con metanol y etanol), así como sus respectivos blancos (etilenglicol, hidróxido de sodio y destilado del EPS en estado puro). Los barridos de absorbancias están agrupados por medio de reacción en las siguientes figuras:

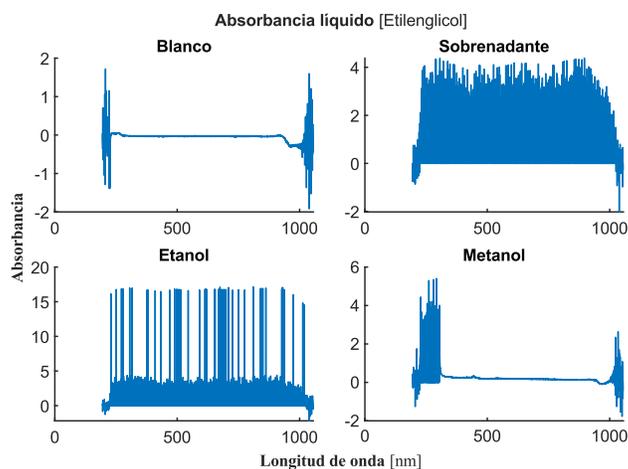


Figura 8. Barrido de absorbancias de los tratamientos con etilenglicol.

En todos los casos, la lectura inicia aproximadamente entre los 200 y 250 nm, en concordancia con la longitud de onda a la que se observan los grupos carboxilo (-COOH), confirmando la presencia de estos y, por tanto, de compuestos ácidos como el tereftálico y el benzoico.

En la Figura 8 esto se ve reforzado al comparar la cantidad de crestas (picos) tanto en el sobrenadante como en el lavado con etanol, y que se extiende cerca de los 1000 nm, pues entre 205 y 300 nm se encuentran el benceno y otros derivados aromáticos (Fernández, 2015). Incluso, por la elevada actividad se podría considerar que se trata de especies vivas (compuestos que siguen reaccionando).

Por otro lado, en la Figura 9 se observan que las bandas están en el límite de los 200 nm, donde se encuentran los alcoholes y compuestos pequeños con radicales hidroxilos (-OH) (Ríos, s.f.). Mientras que, en el límite de los 1000 nm, se encuentran diversos compuestos que deben ser identificados por IR.

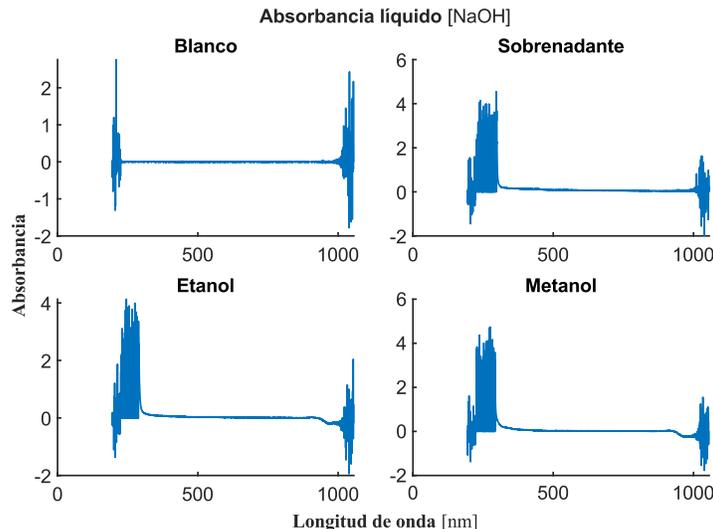


Figura 9. Barrido de absorbancias de los tratamientos con hidróxido de sodio.

El hecho de que no haya crestas y que los valles sean prácticamente planos entre, aproximadamente, 400 y los 900 nm, indica que la despolimerización de la cadena solo es superficial, pues remueve grupos carboxilo de los ácidos, pero no convierte la cadena del PET en sus monómeros, los cuales, en su mayoría, son compuestos aromáticos. Esto está en concordancia con los datos de las Figuras 5 y 6, pues el tratamiento no afectó significativamente la dureza de las hojuelas de PET y, por tanto, no alteró su composición química.

Respecto al barrido de absorbancias de los tratamientos con el destilado del EPS (Figura 10), es interesante observar que las crestas están agrupadas entre los 200 y 300 nm, que es el rango en el que se encuentran los aromáticos alternantes y conjugados, lo cual está acorde a la composición química de dicho destilado.

Particularmente resulta interesante el pico que se presenta cerca de los 1000 nm en el sobrenadante, pues tiene una absorbancia considerablemente mayor que la del resto de los compuestos en cualquiera de los otros tratamientos, y que podría estar relacionado con el incremento en la dureza de las hojuelas que no fueron sometidas a ningún lavado, como se observa en la Figura 5.

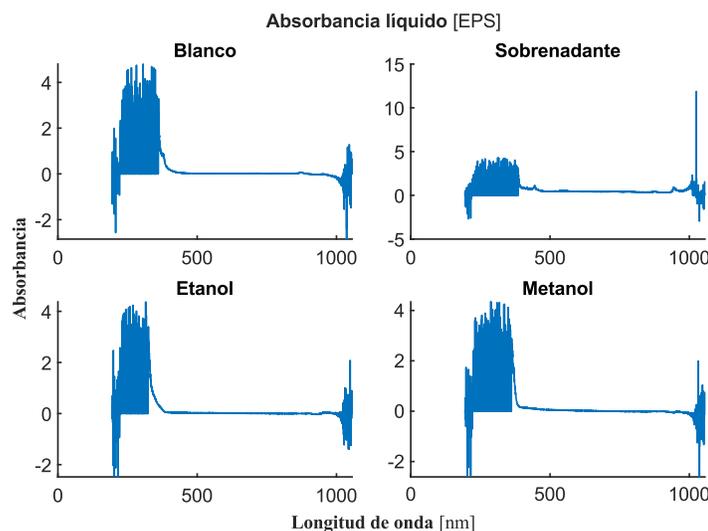


Figura 10. Barrido de absorbancias de los tratamientos con destilado del EPS.

También se hizo un barrido de absorbancias a las muestras sólidas, las cuales se analizaron por exposición directa de la muestra.

En la Figura 11 se muestra el barrido de absorbancias del PET sin tratamiento, etiquetado como PET Transparente, en comparación con las hojuelas de PET que se sometieron a las diferentes condiciones de los tres medios de reacción empleados (destilado del EPS, etilenglicol e hidróxido de sodio), previo a los lavados alcohólicos.

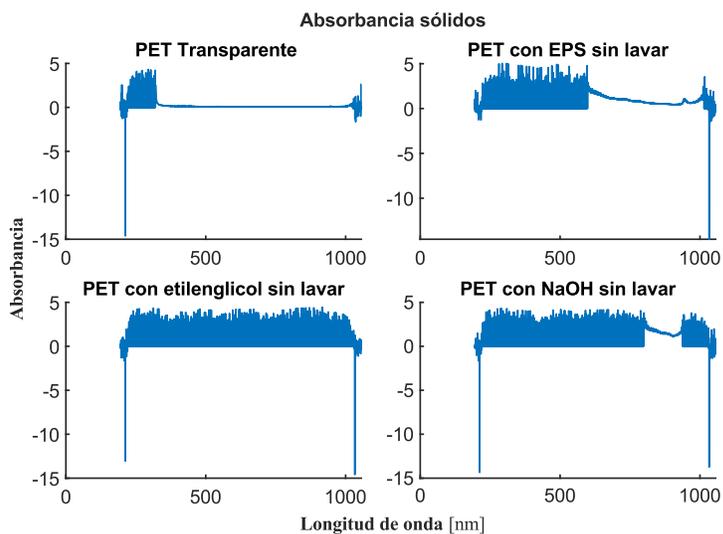


Figura 11. Barrido de absorbancias de hojuelas de PET sin y con tratamientos.

En la Figura 12 se muestra el barrido de absorbancias del PET sin tratamiento, etiquetado como PET Transparente, en comparación con las hojuelas de PET que reaccionaron con el destilado del EPS, y sus posteriores lavados alcohólicos.

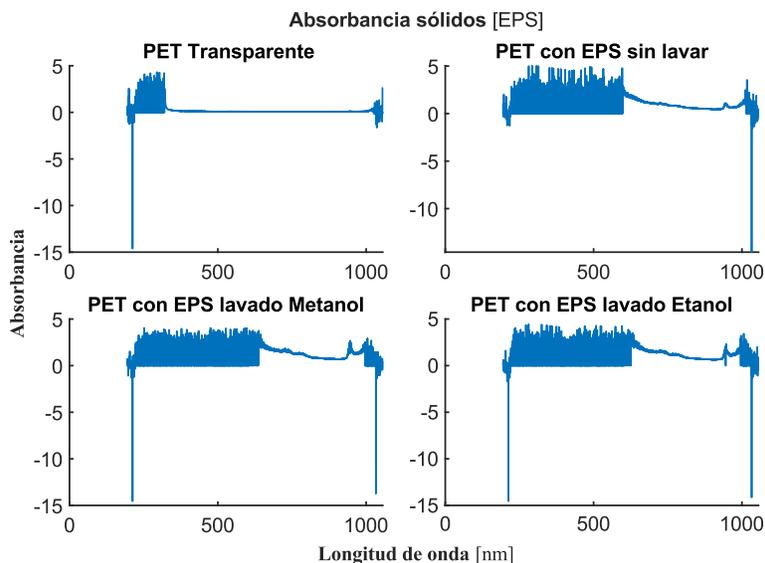


Figura 12. Barrido de absorbancias de hojuelas de PET sin y con los tratamientos del destilado de EPS.

En el caso de las muestras sólidas, el barrido de absorbancias presentado en las Figuras 11 y 12, sólo sirven para identificar cambios generales entre ellas derivado de compuestos superficiales. Es recomendable realizar directamente pruebas de transmitancia para estas muestras, con el objetivo de obtener más información.

Observación al microscopio.

Se observaron hojuelas de PET producto de cada tratamiento, con y sin lavados, considerando el color del PET, en un microscopio Mitutoyo® con Moticam 1080, con una magnificación de 15X.

En la figura 5, indicada con anterioridad, se observa la sutil diferencia entre PET blanco y PET gris, la cual queda evidenciada en los tratamientos que se realizaron con posterioridad, sobre todo en los realizados con hidróxido de sodio y sus posteriores lavados alcohólicos.

En las siguientes figuras se observan los cambios superficiales en las hojuelas de PET de los diferentes tratamientos.



Figura 13. Hojuelas de PET blanco producto del tratamiento con etilglicol (EG).

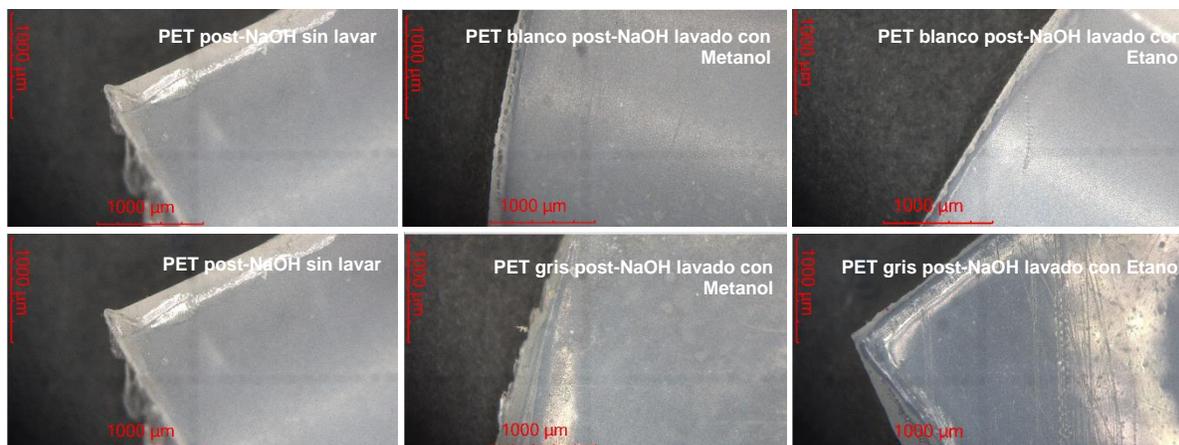


Figura 14. Hojuelas de PET blanco y gris producto del tratamiento con hidróxido de sodio (NaOH).



Figura 15. Hojuelas de PET blanco producto del tratamiento con destilado del poliestireno expandido (EPS).

Conclusiones

El polietileno tereftalato (PET) químicamente es un poliéster con grupos éster funcionales, por lo que puede ser degradado en moléculas más pequeñas, por agua, alcoholes, ácidos, glicoles, etc., como han demostrado diversos autores y como se comprueba en este trabajo, donde se observan los cambios químicos y físicos en hojuelas de PET, sometidas a tres procesos de degradación química distintos: glicólisis, hidrólisis alcalina, y solvólisis.

Aunque la reacción de despolimerización es básicamente la misma, es decir, la cadena polimérica se degrada en los mismos compuestos principales, es interesante observar los efectos del medio de reacción en las propiedades químicas y físicas, y como éstas están intrínsecamente relacionadas. Sobre todo, en aquellas muestras tratadas con el destilado de baja temperatura de la pirólisis del EPS, no sólo porque arrojó datos interesantes, sino porque se estaría logrando utilizar exitosamente un subproducto del reciclaje de un polímero, para reciclar otro.

Los resultados aquí presentados sólo son el parteaguas de una investigación mucho más profunda al respecto, pero por sí solos constituyen una aportación científica significativa, pues es el primer trabajo que compara el efecto de dos métodos de degradación tradicionales (sin añadir catalizadores) y un método alternativo, en las propiedades químicas y mecánicas del PET, relacionando incluso, estas entre sí.

Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias al apoyo de los integrantes del Grupo de investigación en Combustibles Alternativos y Motores Térmicos del Departamento de Ingeniería Mecánica de la División de Ingenierías de la Universidad de Guanajuato (CMT.UG). En especial de la M.C. Victoria Paola Cabrera Madera, M.I. Arantxa Montserrat González Aguilar, Ing. María Celeste Santiago Zavala, y la Ing. Zivoni Dalhi Mosqueda Huerta, quienes no solo apoyaron académicamente para explicar los temas y experimentos, sino que se tomaron el tiempo y la disposición de generar un ambiente de confianza y motivación, para hacer esta experiencia tan divertida como enriquecedora.

Se agradece el invaluable apoyo del Dr. Eric Noé Hernández Rodríguez, quien atentamente facilitó el analizador de dureza micro-Vickers (Sinowon®) y el espectrofotómetro UV-VIS (Ocean Optics®). Asimismo, se agradece el apoyo del Dr. Carlos Montero Tavera y del M.I. Cristian Esneider Peñuela Cruz, quienes se tomaron el tiempo de explicar pacientemente el uso correcto de cada uno de los equipos.

Finalmente, también se reconoce el apoyo del Dr. Israel Martínez Ramírez, quien amablemente facilitó el microscopio Mitutoyo® con Moticam 1080, y quien, en conjunto con el M.I. Isai Espinosa Torres, facilitaron la información técnica para el manejo de este.

Bibliografía/Referencias

- Barnard, E., Arias, J., & Thielemans, W. (2021). Chemolytic depolymerisation of PET: a review. *Green Chemistry*.
- Bertolotti, B., Chávez, J., Laos, R., Rospigliosi, C., & Nakamatsu, J. (2005). Poliésteres y Reciclaje Químico del Poli(tereftalato de etileno). *Revista De Química*, 19(1), 13-20.
- Bruno A. Pulido, O. S., & Sandra L. Aristizabal, G. S. (20 de Junio de 2019). Recycled Poly(ethylene terephthalate) for High Temperature. *APPLIED POLYMER MATERIALS*, págs. 2379-2387.
- Carta, D., Cao, G., & D'Angeli, C. (08 de Mayo de 2003). Chemical Recycling of Poly(ethylene terephthalate) (PET) by Hydrolysis and Glycolysis. *Environmental Scientific & Pollution Research*, 10(6), 390-394.
- Daniela Carta, G. C. (08 de Mayo de 2003). Chemical Recycling of Poly(ethylene terephthalate) (PET) by Hydrolysis and Glycolysis. *Research Articles-INCA*, págs. 395-398.
- Elamri, A., Zdiri, K., Harzallah, O., & Lallam, A. (2017). Progress in Polyethylene Terephthalate Recycling. Polyethylene Terephthalate: Uses, Properties and Degradation. *Nova Science Publishers*.
- Elgegren Lituma, M., & Nakamatsu Kuniyoshi, J. (06 de Enero de 2009). POLIÉSTERES INSATURADOS A PARTIR DE DESECHOS DE PET. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 75(1), 26-32.
- Fernández, G. (20 de Mayo de 2015). *Química orgánica*. Recuperado el 14 de Julio de 2023, de <https://www.quimicaorganica.net/absorciones-visible-ultravioleta-compuestos-organicos.html>
- Palmy Paredes, P. G., Alvarado Guilcapi, M. C., & Sánchez Rojas, M. C. (2022). Influencia del tipo de catalizador en el rendimiento de reacción de glucólisis de polietileno tereftalato (PET) post-consumo. *Perfiles*, 1-8.
- Plastics Atlas. (2021). *Atlas del plástico 2020, México*.
- Pulido, B. A., Habboub, O. S., Aristizabal, S. L., Szekely, G., & Nunes, S. P. (2009). Recycled poly(ethylene terephthalate) for high temperature solvent resistant membranes. *Applied Polymer materials*, 2379-2387.
- Ríos, Y. (s.f.). *Yolanda-Rios*. Recuperado el 22 de Julio de 2023, de <https://www.yolanda-rios.net/materiales/UVTeoria.pdf>
- Statista Online. (s.f.). *Annual production of plastics worldwide from 1950 to 2020*. (Statista Online) Recuperado el 3 de Julio de 2023, de <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/#statisticContainer>.
- SUASNAVAS FLORES, D. F. (2017). *Degradación de materiales plásticos "PET" (polyethylene terephthalate), como alternativa para su gestión*. Quito.
- Universidad de Barcelona. (s.f.). *Materials*. Recuperado el 4 de Julio de 2023, de <http://www.ub.edu/cmematerials/es/content/poli-tereftalato-de-etileno>
- Xanthos, M., & Patel, S. (1998). Solvolysis. En *Frontiers in the Science and Technology of Polymer Recycling* (págs. 25-436). Kluwer Academic Publishers.