

Uso de un Catalizador Regenerado de la Unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado para el Reciclaje Químico mediante Glicólisis del Poli-(Tereftalato de Etileno)

Naranjo, Juan^{1,*} ; Palmay, Paul¹ ; Jaramillo, Kerly¹ 

¹Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Riobamba, Ecuador

Resumen: La alta demanda de materiales plásticos ha sido una tendencia post Covid-19 debido a la necesidad de materiales de protección y empaquetado para productos sanitarios y alimentarios. Sin embargo, esta situación ha agravado la problemática medioambiental asociada a la contaminación por residuos plásticos, debido a su largo tiempo de vida, por lo que en los últimos años se ha intensificado la búsqueda de alternativas de su reciclaje. De igual manera, la disposición final de los catalizadores utilizados en la petroquímica representa un importante desafío, puesto que estos terminan en vertederos, siendo un gran foco de contención por su alto contenido de metales pesados. Con este enfoque, el presente estudio tiene como objetivo la evaluación del uso de catalizadores regenerados FCC provenientes de procesos petroquímicos y su aplicación en el proceso de despolimerización mediante glicólisis del poli-(tereftalato de etileno). El catalizador fue regenerado mediante tratamiento térmico y químico, el mismo que posterior a su análisis fue evaluado en el proceso de glicólisis en cantidades del uno y dos por ciento en masa, comparándolo con otros catalizadores convencionales como el acetato de zinc y la zeolita ZSM-5 en la obtención de bis-hidroxi etilen tereftalato (BHET). Los resultados mostraron un rendimiento muy significativo comparado con los otros catalizadores, así también se demostró que la cantidad de catalizador no presenta influencia significativa en el proceso de despolimerización. Resultados que se muestran como una opción prometedora para combatir la problemática de la aglomeración de materiales plásticos.

Palabras clave: Reciclaje químico, poli-(tereftalato de etileno) (PET), glicólisis, despolimerización, regeneración de catalizadores

Use of a Regenerated Catalyst from Fluid Catalytic Cracking for the Poly- (Ethylene Terephthalate) Chemical Recycling via Glycolysis

Abstract: The high demand for plastic materials has been a post-Covid-19 trend due to the need for protective and packaging materials for sanitary and food products. However, this situation has exacerbated the environmental problem associated with plastic waste pollution, which has led to intensified efforts to find recycling alternatives in recent years. The final disposal of catalysts used in petrochemicals also represents a significant challenge, as they end up in landfills and are a major source of contamination due to their high heavy metal content. This study aims to evaluate the use of regenerated FCC catalysts from petrochemical processes in the depolymerization process of poly-(ethylene terephthalate) by glycolysis. The results showed that the regenerated catalyst had a significant performance compared to conventional catalysts such as zinc acetate and ZSM-5 zeolite in obtaining bis (hydroxyethyl terephthalate) (BHET), and the amount of catalyst did not significantly affect the depolymerization process. These results show a promising option for addressing the problem of plastic waste.

Keywords: Chemical recycling, poly-(ethylene terephthalate) (PET), glycolysis, depolymerization, catalyst regeneration

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas los plásticos de un solo uso han tenido una creciente demanda debido a su versatilidad y

bajo costo, sin embargo una mayor producción conlleva una mayor generación de residuos, los cuales se han convertido en un punto trascendental desde el punto de vista ambiental en la agenda mundial, es así que, se estima que cada año al menos 8 millones de toneladas de

*naranjosilvajuanantonio@gmail.com

Recibido: 23/07/2023

Aceptado: 04/10/2023

Publicado en línea: 09/02/2024

10.33333/tp.vol53n1.05

CC 4.0

residuos plásticos son vertidas a los océanos (Sheel & Pant, 2019), representando una amenaza para la vida marina y el medio ambiente en general. Además, el plástico presenta una naturaleza no biodegradable y es un material que tarda cientos de años en descomponerse, por lo que su acumulación puede tener consecuencias a largo plazo (Al-Sabagh et al., 2016). De este modo, es necesario tomar medidas y concientizar a los estados con el fin de reducir el uso de plásticos de un solo uso, fomentando de este modo la reutilización y el reciclaje, y así buscar alternativas más sostenibles (Sheel & Pant, 2019). En este sentido, la innovación y la investigación son fundamentales para desarrollar e invertir en nuevos materiales y tecnologías que permitan reducir la dependencia del plástico y mejorar la gestión de residuos plásticos (Bahramian, 2021).

A nivel global se han presentado varias iniciativas que se están llevando a cabo, que incluye la implementación de políticas públicas para reducir el consumo de plásticos, la promoción de la economía circular para fomentar la reutilización, y el desarrollo de materiales biodegradables y compostables que sean una alternativa al uso de materiales plásticos los cuales sean menos perjudiciales para el medio ambiente (Sheel & Pant, 2019). Organismos internacionales estimaron que en el año 2015 se generaron más de 6 300 millones de toneladas métricas de residuos plásticos en todo el mundo. Sin embargo, solo el 9 % de esos desechos fue reciclado, el 12 % fue sometido a incineración y el restante 79 % se encuentra acumulado en el medio ambiente (Wang et al., 2018).

De este modo, ante la problemática global generada por el uso excesivo y la gestión inadecuada de estos residuos, han surgido diversas estrategias de reciclaje para abordar este desafío (Sangalang et al., 2015). Una de las alternativas más alentadoras es el reciclaje químico, puesto que ofrece múltiples beneficios, entre ellos la posibilidad de reciclar plásticos de baja calidad que no pueden ser reciclados por métodos convencionales. Además, esta técnica permite la recuperación de compuestos de interés industrial similares a los producidos por petroquímica, reduciendo la dependencia de recursos naturales y la necesidad de producir nuevos plásticos (Al-Sabagh et al., 2016; Fuentes et al., 2020; Ramirez et al., 2010).

Esta técnica se basa en la despolimerización de las cadenas de politereftalato de etileno (PET) (Bahramian, 2021), mediante procesos químicos específicos que permiten su conversión en monómeros, dímeros y oligómeros, así como la producción de subproductos gaseosos (Bertolotti et al., 2005; Stoski et al., 2016), los mismos que pueden ser reutilizados mediante la repolimerización para obtener plásticos vírgenes (Bertolotti et al., 2005; Fuentes et al., 2020).

En la actualidad, esta problemática ha desatado nuevas formas de tratamiento de los desechos plásticos lo cual ha despertado el interés de la comunidad científica, siendo el reciclaje químico una alternativa para lidiar con

este inconveniente (Bertolotti et al., 2005; Raheem et al., 2019).

El uso de calor y la limitada presencia de oxígeno es el principio básico para los métodos convencionales de reciclaje químico como la pirólisis y la gasificación que descomponen el polímero sin que exista combustión en el proceso (Bhoi & Rahman, 2022). Además de estas, existen otros métodos que hacen uso de disolventes como es el caso de la glicólisis, la cual consiste en la despolimerización y rompimiento de las cadenas largas de PET por acción de un glicol, entre ellos se encuentra el etilenglicol, propilenglicol, trietilenglicol (Fuentes et al., 2020; Mendiburu-Valor et al., 2021). El etilenglicol es el disolvente más usado en la obtención de bis-tereftalato de hidroxietilo (BHET). Es importante mencionar que la conversión del dímero de BHET en monómeros de BHET es una reacción donde es necesaria la acción de catalizadores que actúen en la conversión de oligómeros a dímeros o monómeros (Esquer & García, 2019). La glicólisis catalítica es aquella que presenta mayor selectividad hacia el BHET, cuya principal característica es el uso de catalizadores, con la finalidad de aumentar la tasa de conversión de PET a BHET (Esquer & García, 2019; Sheel & Pant, 2019), estos son esenciales para acelerar el proceso de transesterificación entre el etilenglicol y los grupos éster del PET, lo que permite obtener los monómeros de BHET de manera más eficiente. Es así como estudios cinéticos realizados con anterioridad han demostrado la efectividad de los catalizadores ya que por medio de estudios cinéticos, se determinó que la reacción sin el uso de catalizadores es extremadamente lenta, tomando hasta 8 horas para completarse. Así también, la energía de activación para esta reacción sin catalizador es alta con un valor de 32 kcal/mol, en contraste, cuando se utiliza un catalizador, la reacción ocurre mucho más rápido, y la energía de activación necesaria es menor, de 19 kcal/mol (Sangalang et al., 2015).

Los catalizadores presentan una alta actividad debido a su área superficial, porosidad y resistencia térmica, lo que es fundamental para favorecer la interacción entre reactantes y sitios activos, mejorando así la eficiencia del proceso de reacción, asimismo, estos poseen una distribución uniforme y controlable del tamaño de poro (Che et al., 2019; Han et al., 2021; Wang et al., 2018; Zhao et al., 2015; Zheng et al., 2017).

Con este principio, la industria petroquímica hace el uso de catalizadores en el proceso de fluidización para mejorar la calidad de sus productos. Sin embargo, estos pierden su actividad debido al envenenamiento por metales pesados que se adhieren a su superficie. Por lo tanto, es necesario regenerarlos (Fuentes et al., 2020; Gonzalez et al., 2015; Sánchez, 2018). La neutralización de los sitios ácidos producto del envenenamiento disminuye el rendimiento de nafta aumentando así la producción de coque (Berenguer et al., 2006; Sánchez, 2018). En la actualidad, las limitaciones inherentes al método de regeneración opacan la capacidad de ser reutilizados en repetidas ocasiones, lo que implica que

haya un término definido en su vida útil (Amiri et al., 2011; Sánchez, 2018).

La inadecuada disposición final de los catalizadores usados en procesos petroquímicos como el cracking catalítico fluidizado (FCC) al finalizar su vida útil, es una importante fuente de contaminación ambiental debido a la presencia de elementos en su composición como metales pesados y otros compuestos nocivos (Amiri et al., 2011). Por lo tanto, se hace necesario establecer un tratamiento final definitivo para minimizar los impactos negativos asociados con estos catalizadores y prevenir efectos perjudiciales sobre el medio ambiente y la salud pública. Partiendo de esta premisa, se ha llevado a cabo una investigación para regenerar y caracterizar al catalizador agotado de la unidad FCC de la refinería de Esmeraldas ubicada en la provincia de Esmeraldas Ecuador, mediante tratamientos térmicos y químicos.

El objetivo del presente trabajo fue la utilización de catalizador FCC agotado en despolimerización de PET mediante glicólisis catalítica con el fin de determinar su acción catalítica al ser regenerado y determinar el rendimiento de la reacción variando la relación de catalizador/plástico, para lo propuesto se comparó con catalizadores previamente estudiados: el catalizador comercial ZSM-5 realizada por Zheng et al. (2017) y el acetato de zinc por Alvarado (2021).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Diseño experimental

En este estudio, se llevó a cabo el diseño experimental presentado en la Figura 1, el cual tenía como objetivo determinar el efecto de la variación de la cantidad de tres catalizadores en la glicólisis de PET.

Se ejecutaron 18 experimentos, 6 para cada uno de los catalizadores. En cada conjunto de experimentos, se modificó la cantidad de catalizador en 1 % y 2 % en masa del PET utilizado.

La experimentación para cada cantidad y tipo de catalizador se realizó por triplicado para garantizar la confiabilidad de los datos.

A partir de los resultados obtenidos, se calculó el promedio porcentual para evaluar la eficacia de la cantidad y tipo de catalizador empleado en términos del porcentaje de BHET obtenido. Los datos recopilados se analizaron a través de pruebas estadísticas con el propósito de determinar si se presentaron diferencias significativas entre los resultados obtenidos utilizando los diversos catalizadores y cantidades de catalizador

2.2 Metodología de regeneración

El catalizador agotado FCC se muestreó de forma completamente aleatoria, y se almacenó mediante la metodología presentada por Andrade (2020) y Palmay (2022b), la cual constituye dos procesos que a continuación se detallan.

2.2.1 Tratamiento químico

Consistió en adicionar 200 mL de etanol al 99,9 % v/v con 20 g de catalizador agotado y verterlos en un matraz erlenmeyer de 500 mL. Esta mezcla se agitó con ayuda de un agitador magnético durante un período de 12 horas a 300 revoluciones por minuto. Luego de este tiempo, se filtró la mezcla con ayuda de una bomba de vacío y se dejó secar por al menos 24 horas a una temperatura de 120 °C.

2.2.2 Tratamiento térmico

En este tratamiento se procedió a trasvasar el catalizador previamente tratado químicamente en un crisol de 50 mL, el mismo que fue introducido en la mufla y por medio de rampas horarias, se llevó al catalizador de 100 a 350 °C con rampas de 50 °C/h, teniendo en cuenta que se mantuvo una hora a la temperatura final para proceder con la siguiente rampa que fue de 25 °C/h hasta lograr los 450 °C y del mismo modo que la primera se realizó la tercera rampa hasta llegar a 700 °C, la misma técnica fue realizada en la mufla Thermolyne modelo f48010-33, finalmente se dejó enfriar la muestra a temperatura ambiente.

2.3 Caracterización del catalizador

Uno de los indicadores de actividad catalítica es la acidez (Wang et al., 2018), misma que fue medida por medio de técnicas de desorción de amoníaco, ya que es un indicador clave de la cantidad de centros activos que contiene un catalizador, proceso en el cual la muestra fue desgasificada a 90 °C durante una hora. Posterior a esto, se introdujo en el vial de análisis 0,3 g de muestra y en corriente de He, 25 mL/min, se esperó hasta que se estabilice la señal del detector y se inyectó a 25 °C, 10 mL de amoníaco, al estabilizarse la señal, se elevó la temperatura a 400 °C con rampas de 10 °C/min, obteniendo así el volumen de amoníaco en desorción y se comparó con la curva de calibración existente, en el equipo Micromeritics AutoChem 2920

2.4 Glicólisis

Para cada prueba se alimentó 4 g de PET previamente extruido, se añadió 3 mL de etilenglicol y se adicionó el catalizador (1 y 2 % m/m). A continuación, se realizó un calentamiento progresivo hasta alcanzar una temperatura de 190 °C manteniendo agitación continua a revoluciones bajas por dos horas. La cera obtenida se disuelve con agua caliente y agitación durante 30 minutos, luego se filtró la dilución, la torta de filtrado obtenida se enfrió a 4 °C, esto con la finalidad de obtener cristales de BHET y eliminar totalmente el agua, a continuación, se procedió a secar en una estufa por un lapso de 24 horas a 50 °C, el producto obtenido se recoge y se pesa, según la metodología propuesta por Palmay (2022a) y Zhang et al. (2022).

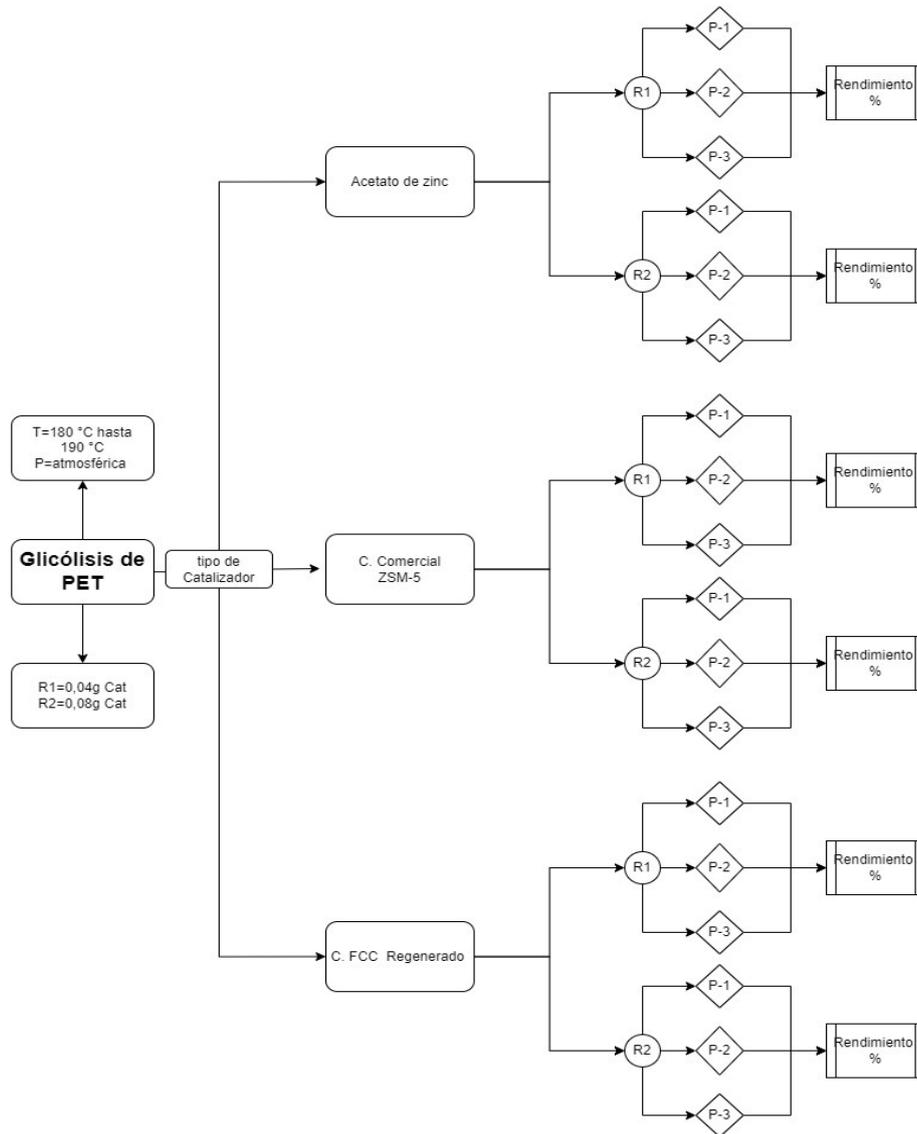


Figura 1. Diseño experimental

2.5 Rendimiento

El rendimiento de la reacción se determinó pesando la cantidad de PET inicial alimentado al reactor, y la cantidad de BHET producido al final de la reacción para lo cual se usó la Ecuación 1:

$$B(\%) = \frac{(W_{BHET})}{(W_0 PET)} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

W BHET = cantidad de BHET producido (g)

W 0 PET = cantidad de PET inicial (g)

2.6 Caracterización FTIR del BHET

Para determinar los principales grupos funcionales característicos presentes en el BHET, las 18 muestras glicolizadas fueron pulverizadas con ayuda de un mortero con el fin de obtener partículas con un tamaño de 60 µm, para su análisis mediante espectrofotometría infrarroja, por medio del espectrofotómetro de infrarrojo FTIR 4 100 de la marca Jasco, cuyo rango de medición

del número de onda es de 7 800 a 350 cm⁻¹, resolución máxima de 0,7 cm⁻¹.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Área superficial

La Figura 2 evidencia que la superficie del catalizador regenerado presenta gran porosidad, lo que establece que existe una mayor área superficial y por ende aumenta la superficie de contacto entre la superficie del catalizador con las moléculas de PET. Además, se observó que la morfología de la muestra analizada presenta una estructura variable en cuanto a su tamaño.

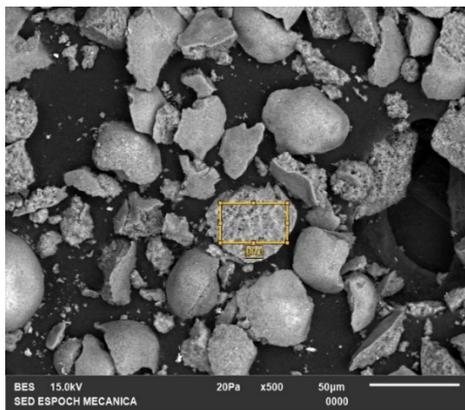


Figura 2. Microscopía SEM Cat. Regenerado
Fuente: (Palmay, 2022b)

El análisis de composición EDS permitió determinar que el catalizador regenerado tiene un alto contenido de aluminio y silicio, y su relación es cercana a 1 esto es muy característico en catalizadores agotados. Según Palmay (2022b), la cantidad de los componentes principales del catalizador no ha sufrido cambios importantes, además evaluó el nivel de regeneración del catalizador al comparar la relación Si/Al del catalizador recuperado con los resultados obtenidos de la relación Si/Al para catalizadores nuevos (Kassargy et al., 2017). Este fenómeno se debe a que el etanol presenta una alta capacidad solvente de los contaminantes del catalizador, sin alterar el soporte del catalizador, como se observa en la Tabla 1 y Figura 3.

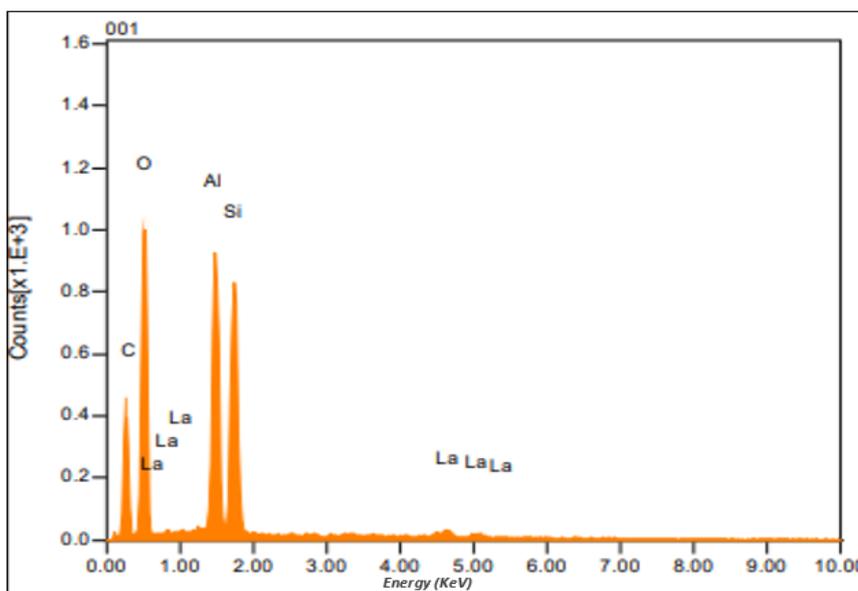


Figura 3. Imagen EDS Cat. Regenerado

Tabla 1. Composición del catalizador regenerado

Componente	(%)
Aluminio (Al)	20,550
Hierro (Fe)	0,570
Silicio (Si)	19,540
Lantano (La)	3,110
Si-Al	0,951

3.2 Caracterización del catalizador

Los datos obtenidos de acidez, mediante desorción de amoníaco en el equipo Micromeritics AutoChem 2 920, se muestran en la Tabla 2, en la cual se pudo observar que la tasa de desorción de amoníaco del catalizador comercial es mayor que la del catalizador regenerado. Esto sugiere que el catalizador comercial cuenta con una mayor cantidad de sitios activos, lo que implica que es más ácido que el catalizador regenerado

Se ha demostrado que la acidez juega un papel importante en la actividad de los catalizadores, ya que los centros activos en la estructura del catalizador son

esenciales para romper los enlaces del polímero, puesto que, disminuyen el tiempo y temperatura de reacción (Esquer & García, 2019; Wang et al., 2021).

Tabla 2. Cantidad de desorción de amoníaco

Muestra	Masa (g)	Temperatura (°C)	Valor (cm ³ /g)
CC	0,3691	200,0	253,78
Reg	0,3657	87,2	32,02

El volumen es calculado en condiciones normales: 1 atm y 273 K

Para lo cual es importante trabajar con zeolitas protonadas o con puntos ácidos y evitar el uso de zeolitas sódicas que presentan una disminución significativa de la

acidez y, por lo tanto, una temperatura de degradación progresivamente más alta (Coelho et al, 2012).

3.3 Rendimientos

En la Tabla 3, se pueden visualizar los rendimientos de cada uno de los experimentos realizados con los diferentes tipos y cantidades de catalizador y en la Figura 4 se evidencia el histograma de medias porcentuales del rendimiento del catalizador.

Tabla 3. Rendimiento de los catalizadores

Acetato de zinc						
Catalizador	0,04 g			0,08 g		
Pruebas	1	2	3	1	2	3
Cant. Catalizador (g)	0,045	0,042	0,044	0,084	0,080	0,081
Cant. PET (g)	4,021	4,022	4,027	4,057	4,084	4,057
Cant. BHET (g)	3,321	3,414	3,356	3,416	3,398	3,578
Rendimiento (%)	82,59	84,88	83,34	84,20	83,20	88,19
Media porcentual (%)	83,60			85,20		
Catalizador regenerado						
Catalizador	0,04 g			0,08 g		
Pruebas	1	2	3	1	2	3
Cant. Catalizador (g)	0,042	0,042	0,044	0,084	0,082	0,081
Cant. PET (g)	4,011	4,005	4,02	4,014	4,030	4,210
Cant. BHET (g)	3,012	3,105	3,102	3,021	3,118	3,207
Rendimiento (%)	75,09	77,53	77,16	75,26	77,37	76,17
Media porcentual (%)	76,59			76,26		
Catalizador comercial						
Catalizador	0,04 g			0,08 g		
Pruebas	1	2	3	1	2	3
Cant. Catalizador (g)	0,043	0,041	0,046	0,087	0,081	0,082
Cant. PET (g)	4,060	4,073	4,045	4,046	4,004	4,017
Cant. BHET(g)	3,384	3,257	3,192	3,365	3,298	3,425
Rendimiento (%)	83,35	79,96	78,91	83,17	82,36	85,26
Media porcentual (%)	80,74			83,59		

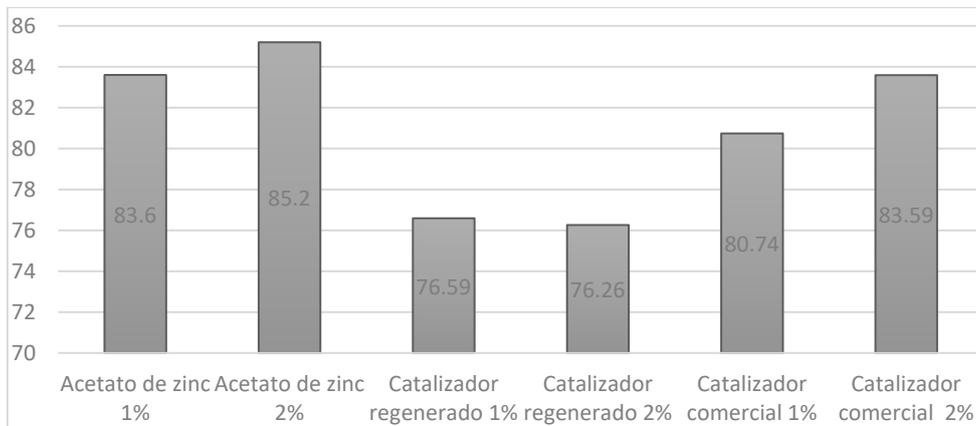


Figura 4. Histograma de medias porcentuales de rendimiento del catalizador en despolimerización de PET

De acuerdo a lo que se presenta en la Figura 4 y al análisis de varianzas de los rendimientos obtenidos en la experimentación se tiene que el catalizador regenerado presenta un rendimiento del 76% aproximadamente y que

la cantidad de catalizador estadísticamente no afecta en el porcentaje de producto obtenido. Este rendimiento del catalizador regenerado se atribuye que al ser un catalizador ya agotado y con un re procesamiento pierde

los puntos ácidos de su estructura en el procesamiento para su regeneración dificultando el craqueo de las moléculas. Sin embargo, estos rendimientos son alentadores ya que se está orientando a la economía circular alrededor de estos catalizadores.

Se comparó el rendimiento de cada catalizador, obteniendo como resultado que el acetato de zinc tiene el rendimiento más alto en cuanto a la reacción de despolimerización del PET.

Al-Sabagh et al. (2014) y Sheel & Pant (2019), mencionan en sus investigaciones que, los acetatos metálicos constituyen el grupo más activo para la reacción debido a su baja energía de ionización para la activación de los grupos carbonilo, permitiendo la inserción del etilenglicol y por ende la ruptura del polímero, siguiendo el orden $Zn^{+2} > Mn^{+2} > Co^{+2} > Pb^{+2}$ en cuanto a la eficiencia como catalizador.

Además, Wang et al. (2021) indican que el uso de zeolitas como catalizador es adecuado y sustentable con el medio ambiente, ya que los catalizadores de metales pesados son muy contaminantes.

Con base en los resultados obtenidos, se determinó que la acción catalítica y el rendimiento son mejores en los acetatos metálicos, debido a la capacidad del metal para atacar el grupo carbonilo del polímero. Sin embargo, es importante mencionar que los catalizadores no logran una regeneración completa, lo que disminuye su actividad. Esto se debe a que, durante el proceso de regeneración, las partículas de catalizador pueden quedar entre los sitios intersticiales, lo que reduce el área superficial y, por lo tanto, la actividad catalítica, como se menciona en la investigación de Idriss & Barteau (2000).

3.4 Análisis estadístico

Tabla 5. Test de TUKEY

Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC 95 %	Valor T	Valor P ajustado
2-1	4,15	1,54	(-0.12;8,42)	2,70	0,054

Nivel de confianza individual = 95,00 %

3.5 Espectroscopia FT-IR del producto glicolizado

La despolimerización con la acción de glicoles genera monómeros de BHET, el cual posee grupos funcionales inherentes que son más específicos en su huella dactilar, estos fueron identificados con ayuda de métodos de instrumentación, los espectros de cada una de las muestras se presentan en la Figura 5, donde se observa la presencia de grupos funcionales inherentes del BHET mismos que fueron interpretados por Shurvell (2006).

Se identificaron grupos hidroxilo OH^- en la banda de absorción en $3\ 417,24\ cm^{-1}$; mientras que la presencia de grupos alquilo como CH_2 y CH_3 se evidencia en dos bandas de absorción en $2\ 965,98\ cm^{-1}$ y $2\ 884,99\ cm^{-1}$.

Asimismo, se detectó el grupo carbonilo por la presencia de la banda de absorción en $1\ 708,62\ cm^{-1}$.

En el Software Minitab se obtuvo los datos estadísticos del test ANOVA que se muestra en la Tabla 4, así como simultáneamente se realizó el test de Tukey, con la finalidad de obtener los datos de la influencia que tiene la cantidad (A) y tipo del catalizador (B) en el rendimiento obtenido teniendo en cuenta el diseño experimental que se muestra en la Figura 3.

Tabla 4. Test ANOVA

Fuente	GL	Sc Ajust.	Mc. Ajust	Valor F	Valor P
Modelado	5	219,053	43,811	14,00	0,000
Lineal	3	211,374	70,458	22,52	0,000
A (cantidad Cat)	1	8,515	8,515	2,72	0,125
B (tipo Cat)	2	202,859	101,430	32,42	0,000
Interacciones 2T	2	7,678	3,839	1,23	0,327
A*B (cant. / tipo)	2	7,678	3,839	1,23	0,327
Error	12	37,540	3,128		
Total	17	25,592			

Se realizaron tres comparativas: la interacción de cantidad de catalizador, tipo de catalizador y la interacción de tipo y cantidad del catalizador y se pudo evidenciar que el tipo de catalizador influye en el rendimiento de la reacción, ya que el nivel de significancia P es mucho menor a 0,05 descartando la hipótesis nula.

Al descartar la hipótesis se procedió a realizar el test de TUKEY, que se observa en la Tabla 5, con el fin de comparar los rendimientos del catalizador comercial y el catalizador regenerado, se puede observar que no existe variación significativa entre el uso de los 2 catalizadores

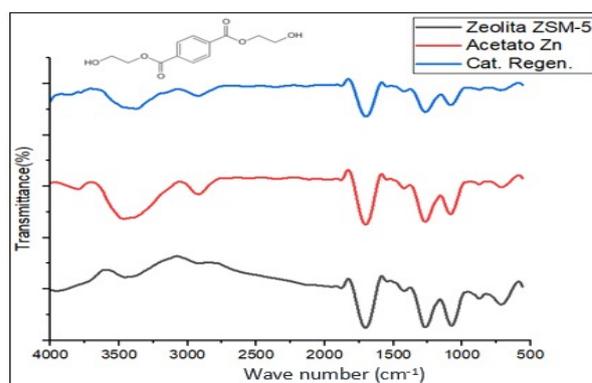


Figura 4. Espectro IR de BHET

Por otro lado, los enlaces carbono hidrógeno C-H son posibles de identificar por la presencia de las bandas de absorción $1\ 407,78\ cm^{-1}$; $1\ 342,21\ cm^{-1}$; $1\ 454,06\ cm^{-1}$ y $1\ 508,06\ cm^{-1}$.

Además, se identificaron ésteres en la muestra por la banda de absorción en $1\,257,36\text{ cm}^{-1}$. Por último, las bandas de absorción en $1\,018,23\text{ cm}^{-1}$ y $1\,122,37\text{ cm}^{-1}$ indican la presencia de grupos éteres y alcoholes, mientras que la presencia de un anillo aromático fue detectada en la banda de absorción en $721,25\text{ cm}^{-1}$.

4. CONCLUSIONES

Tras el análisis de los resultados obtenidos en el presente estudio de investigación, se ha demostrado que la glicólisis catalítica del PET tiene afinidad por catalizadores de baja selectividad, como es el caso del catalizador de fraccionamiento catalítico fluidizado (FCC).

En la reacción de despolimerización los resultados obtenidos son prometedores ya que presentan un rendimiento del 76 %, lo que sugiere que el catalizador en cuestión podría ser una alternativa viable para su uso en reciclaje químico.

Por otra parte, la regeneración del catalizador de la unidad de fraccionamiento catalítico fluidizado (FCC) es viable y podría proporcionar una solución sumamente rentable para la disposición final de los residuos de la petroquímica, solucionando problemas de carácter ambiental y económico, mientras que la glicólisis ofrece un valor agregado a los residuos plásticos que carecen de valor y que, al ser tratados con despolimerización, se convierten en materiales nuevamente utilizables en distintos tipos de industrias, siendo el BHET fundamental en la síntesis de diversos materiales poliméricos, que incluyen desde resinas de poliéster insaturadas y tereftalato de polietileno (PET) hasta la elaboración de sistemas biocompatibles novedosos (Xi et al., 2005).

También se ha demostrado que la cantidad del catalizador empleado no influye significativamente en los resultados, posiblemente debido a la irregularidad de su superficie y la limitación de sus sitios activos en comparación con los catalizadores de carácter comercial. Además, el uso de catalizadores no selectivos como el catalizador FCC en glicólisis, contribuye a reducir la dependencia de acetatos metálicos como catalizadores. Cabe destacar que el uso de metales como el plomo y el zinc son altamente selectivos pero sus iones son sumamente contaminantes, lo que hace que su uso no sea una opción viable para procesos químicos sostenibles y respetuosos con el medio ambiente.

En consecuencia, los resultados de este estudio sugieren que el catalizador de la unidad de fraccionamiento catalítico fluidizado (FCC) podría ser una opción prometedora para la glicólisis catalítica del PET y su aplicación en el reciclaje de plásticos, lo que podría contribuir significativamente a la reducción de la contaminación ambiental y el avance hacia una economía circular más sostenible.

REFERENCIAS

- Al-Sabagh, A. M., Yehia, F. Z., Eissa, A. M. F., Moustafa, M. E., Eshaq, G., Rabie, A. M., & Elmetwally, A. E. (2014). Cu- and Zn-acetate-containing ionic liquids as catalysts for the glycolysis of poly(ethylene terephthalate). *Polymer Degradation and Stability*, *110*, 364–377. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.10.005>
- Al-Sabagh, A. M., Yehia, F. Z., Eshaq, G., Rabie, A. M., & Elmetwally, A. E. (2016). Greener routes for recycling of polyethylene terephthalate. *Egyptian Journal of Petroleum*, *25*(1), 53–64. <https://doi.org/10.1016/J.EJPE.2015.03.001>
- Alvarado, M. (2021). Determinación de la influencia del tipo de catalizador en el rendimiento de reacción de glucólisis de poli tereftalato de etileno (PET) post-consumo. [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba.]. Repositorio DSPACE Espoch. <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/16763>
- Amiri, F., Yaghmaei, S., Mousavi, S. M., & Sheibani, S. (2011). Recovery of metals from spent refinery hydrocracking catalyst using adapted *Aspergillus niger*. *Hydrometallurgy*, *109*(1–2), 65–71. <https://doi.org/10.1016/J.HYDROMET.2011.05.008>
- Andrade Avila, L. (2020). *Regeneración de catalizadores agotados de la unidad de Cracking Catalítico Fluidizado (FCC) de refinería, para su utilización en pirólisis catalítica*. [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.]. Repositorio DSpace Espoch. <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/16707>
- Bahramian, A. (2021). Synergistic effects of gamma irradiation on the PET surface and heat treatment of hydrotalcite catalyst supported by Pt/TiO₂ nanoparticles on PET depolymerization rate. *Surface and Interface Analysis*, *53*(2), 215–229. <https://doi.org/10.1002/sia.6903>
- Berenguer, D., Marcilla, A., & Go, A. (2006). Study of the influence of the characteristics of different acid solids in the catalytic pyrolysis of different polymers. *Applied Catalysis A: General*, *301*(2), 222–231. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2005.12.018>
- Bertolotti, B., Rospigliosi, C., & Nakamatsu, J. (2005). Poliésteres y Reciclaje Químico del Poli(tereftalato de etileno). *Revista de Química*, *19*(1), 13–20. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/18726>
- Bhoi, P. R., & Rahman, M. H. (2022). Hydrocarbons recovery through catalytic pyrolysis of compostable and recyclable waste plastics using a novel desk-top staged reactor. *Environmental Technology & Innovation*, *27*, 102453. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2022.102453>
- Che, Q., Yang, M., Wang, X., Yang, Q., Rose Williams, L., Yang, H., Zou, J., Zeng, K., Zhu, Y., Chen, Y.,

- & Chen, H. (2019). Influence of physicochemical properties of metal modified ZSM-5 catalyst on benzene, toluene and xylene production from biomass catalytic pyrolysis. *Bioresource Technology*, 278, 248–254. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2019.01.081>
- Coelho, A., Costa, L., Marques, M. M., Fonseca, I. M., Lemos, M. A. N. D. A., & Lemos, F. (2012). The effect of ZSM-5 zeolite acidity on the catalytic degradation of high-density polyethylene using simultaneous DSC/TG analysis. *Applied Catalysis A: General*, 413–414, 183–191. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2011.11.010>
- Esquer, R., & García, J. J. (2019). Metal-catalysed Poly(Ethylene) terephthalate and polyurethane degradations by glycolysis. *Journal of Organometallic Chemistry*, 902, 120972. <https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2019.120972>
- Fuentes, C. A., Gallegos, M. V., García, J. R., Sambeth, J., & Peluso, M. A. (2020). Catalytic Glycolysis of Poly (ethylene terephthalate) Using Zinc and Cobalt Oxides Recycled from Spent Batteries. *Waste and Biomass Valorization*, 11(9), 4991–5001. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00807-6>
- Gonzalez, M. R., Pereyra, A. M., & Basaldella, E. I. (2015). Reconversión de catalizadores agotados de FCC para su uso en purificación de efluentes acuosos. *Investigación Joven*, 2(2), 86-87. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/51259>
- Han, Y., Yu, J., Chen, T., Liu, X., & Sun, L. (2021). Study on catalytic pyrolysis mechanism of natural rubber (NR) over Zn-modified ZSM5 catalysts. *Journal of the Energy Institute*, 94, 210–221. <https://doi.org/10.1016/J.JOEL.2020.09.005>
- Idriss, h., & barteau, m. (2000). Active Sites on Oxides: From Single Crystals to Catalysts. *Advances in Catalysis*, 45(M), 261–331. [https://doi.org/10.1016/s0360-0564\(02\)45015-8](https://doi.org/10.1016/s0360-0564(02)45015-8)
- Kassargy, C., Awad, S., Burnens, G., Kahine, K., & Tazerout, M. (2017). Experimental study of catalytic pyrolysis of polyethylene and polypropylene over USY zeolite and separation to gasoline and diesel-like fuels. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 127, 31–37. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2017.09.005>
- Mendiburu-Valor, E., Mondragon, G., González, N., Kortaberria, G., Eceiza, A., & Peña-Rodríguez, C. (2021). Improving the efficiency for the production of bis-(2-hydroxyethyl) terephthalate (BHET) from the glycolysis reaction of poly(ethylene terephthalate) (PET) in a pressure reactor. *Polymers*, 13(9), 1461. <https://doi.org/10.3390/polym13091461>
- Palmay, P., Alvarado, M & Sánchez, M. (2022a). Influencia del tipo de catalizador en el rendimiento de reacción de glucólisis de poli Tereftalato de etileno (pet) post consumo. *Perfiles*, 1(28), 6–13. <https://doi.org/10.47187/perf.v1i28.172>
- Palmay, P., Medina, C., Donoso, C., Barzallo, D., & Bruno, J. C. (2022b). Catalytic pyrolysis of recycled polypropylene using a regenerated FCC catalyst. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 1, 7–11. <https://doi.org/10.1007/S10098-022-02453-4/FIGURES/7>
- Raheem, A. B., Noor, Z. Z., Hassan, A., Abd Hamid, M. K., Samsudin, S. A., & Sabeen, A. H. (2019). Current developments in chemical recycling of post-consumer polyethylene terephthalate wastes for new materials production: A review. *Journal of Cleaner Production*, 225, 1052–1064. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.019>
- Ramirez, A., Navarro, L. G., & Conde, J. C. (2010). Degradación química del poli (etilen tereftalato). *Revista Colombiana de Química*, 39(3), 321–331. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/articler/view/20354>
- Sánchez, G. M. (2018). *Degradación catalítica de polietileno de baja densidad utilizando catalizadores de FCC*. [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio DSPACE IPN. <http://tesis.ipn.mx/xmlui/handle/123456789/24873>
- Sangalang, A., Bartolome, L., & Kim, D. H. (2015). Generalized kinetic analysis of heterogeneous PET glycolysis: Nucleation-controlled depolymerization. *Polymer Degradation and Stability*, 115, 45–53. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMDEGRADSTA.2015.02.012>
- Sheel, A., & Pant, D. (2019). Chemical Depolymerization of PET Bottles via Glycolysis. *Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles* 61-94. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811361-5.00004-3>
- Shurvell, H. F. (2006). *Spectra – Structure Correlations Spectra – Structure Correlations in the Mid- and Far-infrared*. <https://doi.org/10.1002/9780470027325.s4101>
- Stoski, A., Viante, M. F., Nunes, C. S., Muniz, E. C., Felsner, M. L., & Almeida, C. A. P. (2016). Oligomer production through glycolysis of poly(ethylene terephthalate): effects of temperature and water content on reaction extent. *Polymer International*, 65(9), 1024–1030. <https://doi.org/10.1002/pi.5146>
- Wang, T., Liu, H., Zhang, X., Liu, J., Zhang, Y., Guo, Y., & Sun, B. (2018). Catalytic conversion of NO assisted by plasma over Mn-Ce/ZSM5-multi-walled carbon nanotubes composites: Investigation of acidity, activity, and stability of catalyst in the synergic system. *Applied Surface Science*, 457, 187–199. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2018.06.216>
- Wang, T., Shen, C., Yu, G., & Chen, X. (2021). Fabrication of magnetic bimetallic Co–Zn based zeolitic imidazolate frameworks composites as catalyst of glycolysis of mixed plastic. *Fuel*, 304(April), 121397. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121397>
- Xi, G., Lu, M., & Sun, C. (2005). Study on depolymerization of waste polyethylene

terephthalate into monomer of bis(2-hydroxyethyl terephthalate). *Polymer Degradation and Stability*, 87(1), 117–120.
<https://doi.org/10.1016/J.POLYMDEGRADSTA.2004.07.017>

Zhang, H., Choi, J. I., Choi, J. W., Jeong, S. M., Lee, P. S., & Hong, D. Y. (2022). A highly porous MgAl₂O₄ spinel-supported Mn₃O₄ as a reusable catalyst for glycolysis of postconsumer PET waste. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 115, 251–262.
<https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2022.08.006>

Zhao, X., Wei, L., Cheng, S., Huang, Y., Yu, Y., & Julson, J. (2015). Catalytic cracking of camelina oil for hydrocarbon biofuel over ZSM-5-Zn catalyst. *Fuel Processing Technology*, 139, 117–126.
<https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2015.07.033>

Zheng, Y., Wang, F., Yang, X., Huang, Y., Liu, C., Zheng, Z., & Gu, J. (2017). Study on aromatics production via the catalytic pyrolysis vapor upgrading of biomass using metal-loaded modified H-ZSM-5. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 126, 169–179.
<https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2017.06.011>

BIOGRAFÍAS



Juan, Naranjo Silva, es Ingeniero Químico graduado en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador. Investigador externo en el Grupo de Energías Alternativas y Ambiente ESPOCH.



Paul, Palmay, es Ingeniero Químico de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Máster en Ingeniería Termodinámica de Fluidos en la Universidad de la Roviri i Virgili - España, PhD en Ingeniería Termodinámica de Fluidos en la Roviri i

Virgili-España. Docente Investigador de la ESPOCH e Investigador Senior en el Grupo de Investigación de Ambiente y Desarrollo.



Kerly, Jaramillo, Ingeniera Química graduada en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador. Investigadora externa en el Grupo de Energías Alternativas y Ambiente ESPOCH.

1