

Capítulo 11

Uso de residuos de plástico para producción de energía y de otros productos químicos de alto valor

Alan Castro-Solano¹

María Fernanda Chagoyán-Bernardo¹

Itzel Del Carmen Fonseca-Barrera¹

Patricia Guillermina Mendoza García¹

Carolina Peña-Montes¹

carolina.pm@veracruz.tecnm.mx

<https://doi.org/10.61728/AE20252052>



¹ Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Veracruz.

Resumen

Los plásticos son materiales poliméricos sintéticos de alto peso utilizados en diversas áreas, principalmente para empaques de alimentos; lo cual genera cantidades inmensurables de residuos plásticos que terminan en el ambiente, provocando graves problemas de contaminación. Se estima que solo el 9 % de los residuos generados es reciclado y reutilizado en las cadenas de valor. Por lo tanto, se han generado diferentes alternativas tecnológicas para su transformación no convencional con el fin de reducir y aprovecharlos, entre las que se encuentran la conversión de plástico a energía. Un ejemplo es la pirólisis, que es un proceso de descomposición química en ausencia de oxígeno a una temperatura con un rango de 400 a 800 °C, donde se pueden utilizar catalizadores para mejorar la calidad de los productos obtenidos como aceites y gases. El rendimiento y la calidad de los productos varía dependiendo del residuo plástico utilizado y del tipo de pirólisis (térmica o catalítica). Otra alternativa es la bioconversión de residuos plásticos a productos químicos de alto valor, donde el TPA contenido en PET puede ser transformado por biocatálisis en productos como PHA, PHB, ácido gálico, pirogalol, catecol, ácido mucónico y vanílico. En el caso del PP utilizando métodos térmicos y enzimáticos combinados se puede producir PHA y PHB con *Cupriavidus necator* H16 y ácidos grasos como; esteárico, oleico, linolénico, palmítico y palmitoleico con *Yarrowia lipolytica* 78-003.

Generalidades del plástico

La palabra plástico, proviene del griego *πλαστικός* (*plastikos*), que relaciona a materiales poliméricos sintéticos de alto peso molecular que pueden ser moldeados o formados aplicando calor para adquirir formas sólidas o semisólidas McKen, (2013). Estos materiales desde su invención son muy utilizados por el hombre debido a las propiedades que poseen. (Castro et al., 2020). Por tal motivo la producción de plástico ha

aumentado de forma considerable a nivel mundial siendo 400.3 millones de toneladas en 2023, como lo indican cifras de Plastics Europe, 2023, con los países asiáticos como principales productores liderados por China. Así mismo, los principales usos son en la industria de embalajes y empaques (39 %), edificación y construcción (23 %), piezas plásticas de la industria automotriz (8 %), electrónicos (6 %), artículos de casa, ocio y deportes (4 %), agricultura (4 %) y otros productos (16 %). Es importante destacar que los polímeros plásticos más utilizados para estos fines son el polipropileno (PP) con 18.9 %, polietileno de baja densidad (PE-LD) y polietileno lineal de baja densidad (LLD) con 14.1 % y polietileno de alta densidad (PE-HD) y polietileno de densidad media (MD) con un 12.2 % (Plastics Europe, 2023).

Efectos de la contaminación por residuos plásticos

Debido a las actividades antropogénicas que cada vez utilizan más plásticos se generan una cantidad significativa de residuos plásticos que se convierten en un problema de contaminación (Geyer et al., 2017; Castro et al., 2020; Plastics Europe, 2023). En el medioambiente los residuos plásticos son degradados a micro- y nanoplásticos por intemperización provocando grandes problemas a los ecosistemas y organismos que habitan en zonas contaminadas, los cuales los adquieren debido a su alimentación, y por el medioambiente en agua, suelo y aire contaminado. (Castro et al., 2020). (Figura. 1). Dentro los problemas de salud que pueden generar los residuos plásticos a los animales, incluyendo al ser humano, se encuentran su bioacumulación y los efectos de compuestos químicos tóxicos que se adhieren a estos (Cui et al., 2005; Shi et al., 2006; Ball et al., 2011; Luciani et al., 2014; Li et al., 1999).



Figura 1. Contaminación plástica. Fuente: Tomada por Castro-Solano B.A. septiembre 2023.

El reciclaje, la solución a la contaminación por plástico más usada

Una alternativa que contribuye con la disminución de estos residuos es el “reciclaje”; este ayuda a reincorporar los plásticos considerados como desechos en materiales reutilizables en los procesos productivos, evitando así que terminen en los vertederos. Asimismo, con la revalorización de los residuos plásticos disminuye el consumo de materias primas y otros insumos que son utilizados en la extracción, transporte y procesamiento de nuevos materiales (Acuerdo Nacional para la Nueva Economía del Plástico en México, 2021). Lo anterior implica una disminución de resinas plásticas vírgenes en los productos plásticos, lo que implica una reducción del impacto al medioambiente.

Dentro de las opciones de reciclaje no solo se encuentran aquellas de obtener monómeros de los plásticos para polimerizar, sino también aquellas como la obtención de energía y conversión a productos de interés industrial. (Zhao et al., 2021).

Conversión de plástico

Existen diferentes estrategias de mitigación de estos residuos (Figura 2), entre los que encontramos el reciclaje mecánico, en el cual se lleva a cabo una reducción de tamaño para su aprovechamiento en la manufactura de nuevos artículos; el reciclaje químico, donde a partir del uso de diferentes catalizadores y altas temperaturas, se obtienen productos de interés para la industria, como lo son gases de síntesis a partir de la gasificación, y a partir de la licuefacción, se genera aceite de termólisis para combustibles y productos químicos. Por último, el reciclaje biológico, en el cual, a partir del uso de microorganismos en condiciones de aerobiosis o anaerobiosis, obtenemos una variedad de moléculas de interés biotecnológico (Letcher et al., 2020).

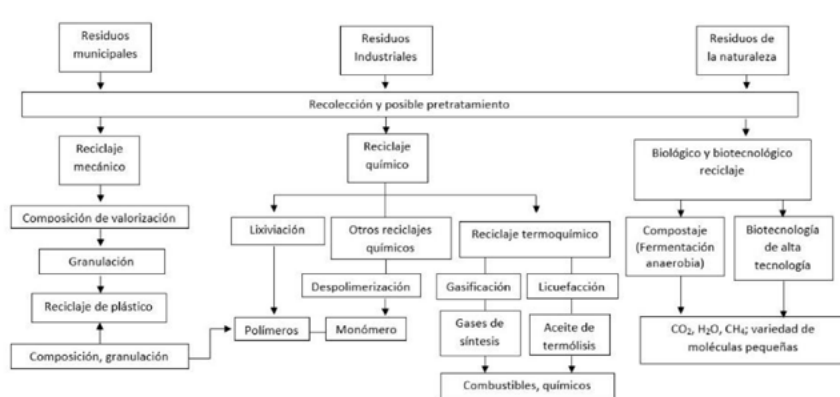


Figura 2. Tecnologías para refinar residuos plásticos. Fuente: Letcher et al., 2020

Conversión de plástico a energía

Una alternativa viable de residuos plásticos, es su gestión mediante métodos de recuperación de energía como la pirólisis, gasificación e incineración. Estas tecnologías tienen como beneficio la producción de energía en forma de calor, esto debido al alto poder calorífico de estos materiales, debido a su naturaleza como producto derivado del petróleo crudo (Al-Salem et al., 2017).

Pirólisis

La pirólisis de residuos plásticos es un proceso de descomposición química de la materia orgánica, causada por el calentamiento a 400- 800 °C en ausencia de oxígeno, presión atmosférica con el uso de varios catalizadores. (Zhao et al., 2021). Los productos obtenidos van a depender de las propiedades que tengan las materias primas (residuos plásticos), dentro de los cuales encontramos el gas que puede representar del 2 al 47 %, el biocarbón 0 a 16 % y el bioaceite 31 a 91 %. (Figura. 3)

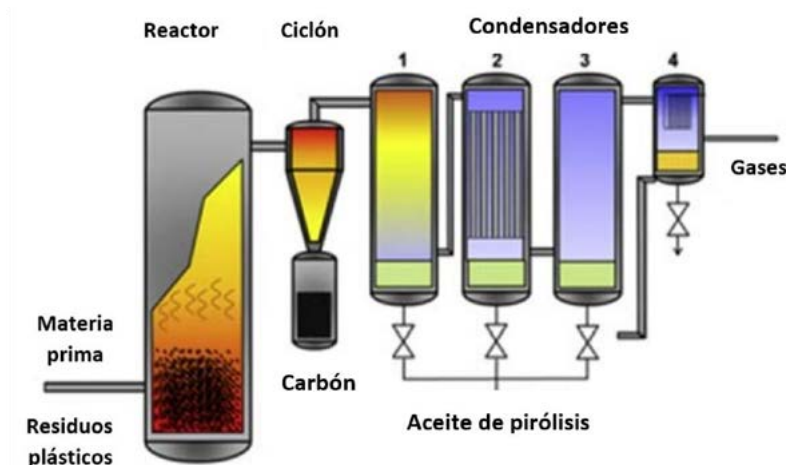


Figura 3. Pasos operativos en la pirólisis de residuos plásticos.
Fuente: Letcher et al., 2020.

Existen dos tipos de pirólisis de acuerdo a la temperatura y condiciones del proceso: pirólisis térmica y pirólisis catalítica.

Pirólisis térmica

Los productos obtenidos del proceso de pirólisis térmica al utilizar residuos plásticos (RSU) son: PP 48.8 % aceite, 1.6 % residuos y gases 49.6 %; PS 71 % aceite, 27 % residuos y 2 % gases; PVC 12.79 % aceite. (Buekens et al., 1998; Miranda et al., 2001; Williams et al., 2007; Letcher et al., 2020).

Pirólisis catalítica

La pirolisis catalítica utiliza catalizadores químicos que ayudan a disminuir la temperatura y el tiempo de retención, la cual la diferencia de la pirólisis térmica, puede llegar a convertir entre el 70 % y el 80 % de los residuos plásticos en aceite líquido de mayor calidad, similar al diésel convencional (Zhao et al., 20221).

Ventajas y desventajas

El aceite obtenido a partir del proceso de la pirólisis catalítica puede ser utilizado como energía, combustible y para generar electricidad. Así mismo, los subproductos como el carbón y gases pueden ser aprovechados. En contraste, el aceite líquido obtenido de la pirólisis térmica es de baja calidad y requiere una temperatura y un tiempo de retención altos (Zhao et al., 2021). Las desventajas de la pirólisis catalítica son dos: los costos de los catalizadores y que su reutilización es menor; por lo tanto, se buscan nuevas opciones de catalizadores que garanticen bajos costos del proceso y así aprovechar mejor esta tecnología (Zhao et al., 2021). (Tabla 1).

Tabla 1. Tipos de pirólisis y sus características

Fuente: Elaboración propia con datos de Letcher et al., 2020.

Térmica	Catalítica
Mayor temperatura craqueo	Menor temperatura craqueo
Tiempos de retención largos	Tiempos de retención cortos
Aceites obtenidos de menor calidad	Mayor velocidad de reacción, producción y calidad de aceites obtenidos
	Mejor selectividad
	Utiliza catalizadores

Pirólisis de polímeros plásticos

Los residuos plásticos que por su poder calorífico (CV) coinciden con los combustibles convencionales como la gasolina, diésel y queroseno, etc., pueden ser utilizados como material de partida para producir energía eléctrica, vapor y calor. (Letcher et al., 2020). Mostrando en la siguiente tabla algunos de los principales plásticos y su poder calorífico superior (HHV, por sus siglas en inglés “High heating value”) (Tabla. 2).

Tabla 2. Poder calorífico superior (HHV) de plásticos

Fuente: Al-Salem et al., 2017.

Plástico	HHV (MJ/kg)	Combustibles con- vencionales	HHV (MJ/kg)
HDPE	46.4-49.4	Gasolina premium	44.5
LDPE	46.4	Gasolina magna	43.4
PP	46.4	Etanol	27
PET	30.2		
PS	41.9		

Dado que las diferentes alternativas químicas para aprovechar los residuos plásticos no son suficientes, se deben seguir buscando estrategias para su eliminación, siendo una de ellas la bioconversión a productos de interés comercial o industrial.

Bioconversión de plástico a otros productos de interés industrial

La bioconversión implica la transformación de un compuesto químico a uno de mayor interés industrial, por la acción de microorganismos o sus enzimas. Se pueden utilizar como materia de partida desechos plásticos para producir estos compuestos; con ello, contribuir a disminuir la contaminación plástica y utilizar estas resinas para la síntesis de nuevos compuestos. (Qi et al., 2021). A continuación, se presentan ejemplos de bioconversión de algunos de los principales plásticos.

A) Bioconversión de PET

Producción y bioconversión de etilenglicol (EG) y el ácido tereftálico (TPA): Una alternativa distinta a la obtención de energía a partir de residuos plásticos de tereftalato de polietileno (PET), es la bioconversión, donde se obtienen productos de las degradaciones parciales de plásticos como el etilenglicol (EG) y el ácido tereftálico (TPA), productos químicos de alto valor (Qi et al., 2021). (Figura. 4).

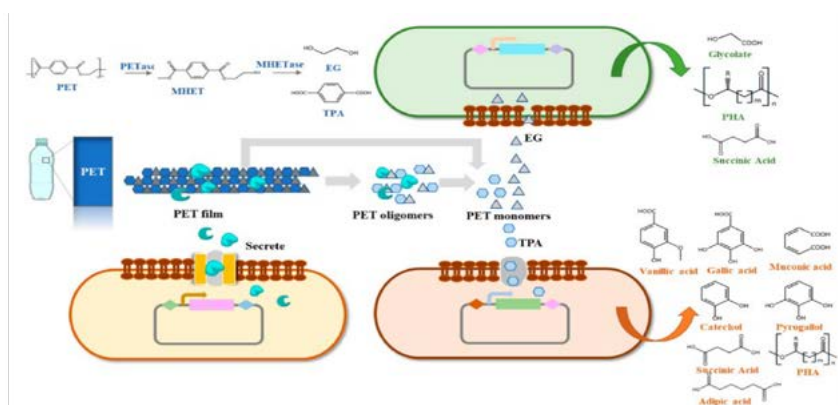


Figura 4. Conversión de PET. Fuente: Qi et al., 2021.
Fuente: Qi et al., 2021.

Etilenglicol (EG)

El EG es utilizado para producir ácido glicólico, un compuesto usado en la industria cosmética (Kraeling et al., 1996). La biotransformación de este compuesto es realizada por bacterias como *Gluconobacter oxydans* DSM2003 y *Burkholderia* sp. 6G13 (Wei et al., 2009a; Gao et al., 2014). Así mismo, se ha reportado la obtención de ácido glicólico a partir de muestras de residuo de PET hidrolizado con la cepa *G. oxydans* KCCM40109 y etilenglicol grado reactivo (Wei et al., 2009b; Kim et al., 2019).

Ácido Tereftálico (TPA)

Kim et al. (2019) reportó la obtención de protocatecuato (PCA) a partir de TPA. PCA es un importante precursor en la biosíntesis de compuestos químicos, con el uso de ingeniería genética. De esta manera a partir de PCA y una expresión heteróloga adicional de diferentes enzimas, se pueden producir ácido gálico (GA), pirogalol, catecol, ácido mucónico y vanílico.

Ácido gálico (GA)

Se ha utilizado protocatecuato (PCA), como sustrato, para producir ácido gálico con la enzima p-hidroxibenzoato hidroxilasa PobA de *Pseudomonas aeruginosa* (Chen et al., 2017), de igual manera Kim et al., 2019, expresó PobA de *P. putida* KT2440 en *E. coli* HBH-1 produciendo 1.4 mM de GA.

Pirogalol

Para la producción de pirogalol se pueden utilizar dos vías, la primera a partir de una descarboxilación de GA por una hidroxilación de PCA y la segunda vía por la hidroxilación del catecol sintetizado por la descarboxilación de PCA (Kambourakis et al., 2000; Jiménez et al., 2013; Wang et al., 2018; Kim et al., 2019).

Ácido mucónico (MA)

A partir de catecol se puede producir ácido mucónico, un compuesto utilizado para producir ácido adípico, utilizado en la fabricación de plásticos. Este compuesto puede ser sintetizado a través de la bioconversión mediante la escisión de su anillo por la enzima catecol 1,2 dioxigenasa CatA de *P. putida* KT2440 (Polen et al., 2012; Han et al., 2015; Johnson et al., 2016). Kim et al., 2019 expresó en la cepa MA-1 los genes para bioconvertir TPA a catecol (TphAabc, TphB y AroY) y CatA, obteniendo 2.7 mM de ácido mucónico a partir de 3.2 mM de TPA.

Ácido vanílico (VA)

La bioconversión de PCA a ácido vanílico (VA) se puede llevar a cabo por la enzima O-metiltransferasa (OMT) utilizando S-adenosil metionina (SAM) como cosustrato (Cantoni et al., 1953; Hocking et al., 1997; Li et al., 1998; Kunjapur et al., 2016). Se realizó la expresión de VA-2a en *E. coli* y se obtuvieron 0.3 mM de VA a partir de 3.4 mM de TPA. (Kim et al., 2019).

Producción de Polihidroxialcanoatos

Los polihidroxialcanoatos (PHA) son poliésteres biodegradables y biocompatibles sintetizados por diferentes microorganismos. (Wang et al., 2014). Algunas bacterias como *Pseudomonas putida* GP16 y *Pseudomonas putida* GO19, pueden producir PHA a partir de PET, obteniendo 8.4 mg/L por hora, durante 12 horas. Así mismo, pueden sintetizar compuestos biosurfactantes como los rammolípidos (Abdel-Mawgoud et al., 2014).

En cuanto a la bioconversión de PET a PHA; Fujiwara et al. (2021) reportaron la producción de PHA a partir de PET utilizando la cepa de *Ideonella sakaiensis* 201-F6, la principal fuente de carbono eran gránulos de PET en un medio mínimo. Por otro lado, Kenny et al. (2008) aislaron tres diferentes especies de *Pseudomona* y evaluaron su capacidad para utilizar TPA como fuente de carbono y obtener polihidroxialcanoatos, encontrando que la cepa denominada como *Pseudomona putida* GO16 fue la más eficiente convirtiendo 4.2 g/L de TPA a 0.25 g/L de PHA. Así mismo, Kenny et al. (2012), utilizaron *Pseudomona putida* GO16 para la producción de PHA de cadenas cortas utilizando como sustrato TPA y glicerol residual del biodiesel. Narancic et al. (2021) analizaron el genoma de la cepa *Pseudomonas umsongensis* GO16 y encontraron que tiene la capacidad de utilizar el TPA para la producción de PHA.

También se ha reportado la producción de polihidroxibutirato (PHB) a partir de tereftalato de bis(2-hidroxietil) (BHET) por Liu et al., (2021), donde se degradaron 5.16 g/L de BHET y se produjeron 3.66 % Polihidroxibutirato (PHB) utilizando un cocultivo con microorganismos recombinantes.

Producción de β -cetoadípatico (β KA)

El ácido β -cetoadípatico es utilizado en la producción de nailon, debido a sus resinas y fibras (Peña-Nuñez, 2016). Este compuesto se puede obtener por la bioconversión de PET a ácido β -cetoadípatico por la bacteria *Pseudomonas putida* KY2440 utilizando 4 esfuerzos secuenciales de ingeniería metabólica. Logrando en este último la producción de 15.1 g / L β KA a partir de BHET al 76 % como lo indica Werner et al., 2021. El ácido β -cetoadípatico también puede ser utilizado en la elaboración de un copoliéster alifático -aromático biodegradable como el poli(butilén adipato-co-tereftalato) (PBAT) (Armas-Pacheco, 2014).

B) Conversión de polietileno (PE)

En el caso de la bioconversión de este polímero, se ha reportado el uso intermedio de la pirólisis. El polietileno posconsumo puede ser utilizado para la producción de plásticos biodegradables, como lo refiere Guzik et al. (2014), el cual obtuvo un 25 % del peso seco celular de PHA por la bacteria *Pseudomonas aeruginosa* PAO-1, a partir del crecimiento con un complejo de parafinas C8-C32 obtenidas de un proceso de pirólisis con el polietileno.

Se ha utilizado también a *Cupriavidus necator* H16 para la producción de polihidroxialcanoatos (PHA) a partir de cera de PE no oxigenada (N-PEW), obtenida previamente de un proceso de pirólisis de polietileno (Johnston et al., 2017).

C) Conversión de Polipropileno (PP)

Utilizando como materia de partida desechos plásticos y con un proceso intermedio de pirólisis térmica, se ha reportado la obtención de propano, el cual, junto con aditivos como el nitrato de bromo y dióxido de silicio a altas temperaturas, genera diferentes compuestos entre los que se encuentran el óxido de propileno, CO_2 y propileno. Estos compuestos se pueden utilizar como sustrato para el crecimiento de diferentes microorganismos, como la levadura *Yarrowia lipolytica*, y de esta manera obtener productos interés industrial como lo son ácidos grasos (Figura 5). (Mihreteab et al., 2019; 2020; Kube et al., 2022).

Otro ejemplo, es la identificación mediante espectrometría de masas de diversos polihidroxicanoatos (PHA) como 3-hidroxibutirato, 3-hidroxisovalerato y 3-hidroxihexanoato; además de PHB, después de la bioconversión de residuos de polipropileno (PP) como fuente adicional de carbono utilizando la bacteria *Cupriavidus necator* H16

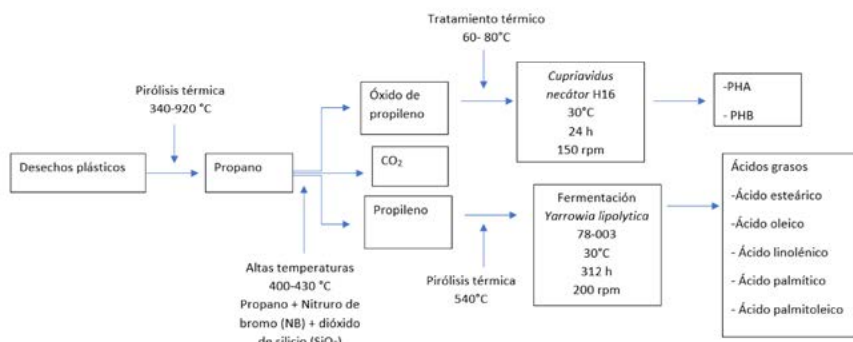


Figura 5. Bioconversión de polipropileno (PP).
Fuente: Elaboración propia (Johnston et al., 2019).

Conclusión

Se ha demostrado que los métodos de obtención de energía a partir de residuos plásticos como la pirólisis térmica y catalítica pueden ser efectivos en la recuperación de energía térmica y aceites de buena calidad, y estos pueden ser aprovechados en los procesos industriales, debido a su HHV similar a los combustibles convencionales. Sin embargo, una alternativa emergente para disminuir y aprovechar los residuos plásticos es la bioconversión, en la cual a partir de diferentes plásticos como el tereftalato de polietileno (PET), polietileno (PE) o el polipropileno (PP), se pueden obtener diferentes moléculas de interés industrial a través de la acción de microorganismos como bacterias o levaduras y sus enzimas. De esta manera, la bioconversión de plásticos, permite el aprovechamiento de sus residuos disminuyendo el impacto al medioambiente y, su revalorización reduce el consumo de resinas plásticas vírgenes e insumos que son utilizados en su extracción, transporte y procesamiento, por lo cual son alternativas emergentes convenientes al reciclaje convencional.

Referencias

- Abdel-Mawgoud, A. M., Lépine, F., & Déziel, E. (2014). A Stereospecific Pathway Diverts β -Oxidation Intermediates to the Biosynthesis of Rhamnolipid Biosurfactants. *Chemistry & Biology*, 21(1), 156-164. <https://doi.org/10.1016/j.chembiol.2013.11.010>
- Acuerdo Nacional para la Nueva Economía del Plástico en México, 2do informe. Diciembre 2021. <https://aniq.org.mx/webpublico/Notas/Nota.asp?id=32#:~:text=Home-,ANIQ%20SE%20SUMA%20AL%20ACUERDO%20NACIONAL%20POR%20LA%20NUEVA%20ECONOM%C3%8DA,9dic.&text=Se%20comprometen%20a%20acopiar%20el,%25%2C%20respectivamente%2C%20al%202030>.
- Al-Salem, S., Antelava, A., Constantinou, A., Manos, G., & Dutta, A. (2017). A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). *Journal Of Environmental Management*, 197, 177-198. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.084>
- Armas Pacheco, F. A. (2014). *Síntesis de poliésteres biodegradables derivados del ácido tereftálico y ácido adípico con 1, 4-butanodiol* [Tesis Doctoral, Universidad Central de Venezuela]. <http://hdl.handle.net/10872/12650>
- Ball, G. L., McLellan, C. J., & Bhat, V. S. (2011). Toxicological review and oral risk assessment of terephthalic acid (TPA) and its esters: A category approach. *Critical Reviews In Toxicology*, 42(1), 28-67. <https://doi.org/10.3109/10408444.2011.623149>
- Buekens, AG y Huang, H. (1998). Catalytic plastics cracking for recovery of gasoline-range hydrocarbons from municipal plastic wastes. *Resources Conservation and Recycling*, 23(3), 163-181.
- Cantoni, GL (1953). S-adenosilmetionina, un nuevo intermedio formado enzimáticamente a partir de L-metionina y adenosintrifosfato. *Revista de Química Biológica*, 204 (1), 403-416.
- Castro-Solano, B.A., Peña-Montes, C., Valerio-Alfaro, G., Peralta-Pelaez, L.A., Sánchez, L.E. (2020). Mineralización de poliésteres contenidos en residuos plásticos. En Navarrete, F.E. (Ed.), *La Eficiencia de las Energías Renovables en México* (pp 111-126). Ave editorial.
- Chen, Z., Shen, X., Wang, J., Wang, J., Yuan, Q., & Yan, Y. (2017). Ra-

- tional engineering of p-hydroxybenzoate hydroxylase to enable efficient gallic acid synthesis via a novel artificial biosynthetic pathway. *Biotechnology and Bioengineering*, 114(11), 2571-2580. <https://doi.org/10.1002/bit.26364>
- Cui, L., Shi, Y., Dai, G., Pan, H., Chen, J., Song, L., Wang, S., Chang, H. C., Sheng, H., & Wang, X. (2005). Modification of N-Methyl-N-Nitrosourea initiated bladder carcinogenesis in Wistar rats by terephthalic acid. *Toxicology And Applied Pharmacology*, 210(1-2), 24-31. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2005.06.008>
- Fujiwara, R., Sanuki, R., Ajiro, H., Fukui, T., & Yoshida, S. (2021). Direct fermentative conversion of poly(ethylene terephthalate) into poly(hydroxyalkanoate) by *Ideonella sakaiensis*. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99528-x>
- Gao, X., Ma, Z., Yang, L., & Ma, J. (2014). Enhanced Bioconversion of Ethylene Glycol to Glycolic Acid by a Newly Isolated *Burkholderia* sp. EG13. *Applied Biochemistry And Biotechnology*, 174(4), 1572-1580. <https://doi.org/10.1007/s12010-014-1114-9>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Guzik, M. W., Kenny, S. T., Duane, G. F., Casey, E., Woods, T., Babu, R. P., Nikodinovic-Runic, J., Murray, M., & O'Connor, K. E. (2014). Conversion of post consumer polyethylene to the biodegradable polymer polyhydroxyalkanoate. *Applied Microbiology And Biotechnology*, 98(9), 4223-4232. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5489-2>
- Han, L., Liu, P., Sun, J., Wu, Y., Zhang, Y., Chen, W., Lin, J., Wang, Q., & Ma, Y. (2015). Engineering catechol 1, 2-dioxygenase by design for improving the performance of the cis, cis-muconic acid synthetic pathway in *Escherichia coli*. *Scientific Reports*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/srep13435>
- Hocking, M. B. (1997). Vanillin: Synthetic Flavoring from Spent Sulfite Liquor. *Journal Of Chemical Education*, 74(9), 1055. <https://doi.org/10.1021/ed074p1055>
- Jiménez, N., Curiel, J. A., Reverón, I., De las Rivas, B., & Muñoz, R. (2013). Uncovering the *Lactobacillus plantarum* WCFS1 Gallate

- Decarboxylase Involved in Tannin Degradation. *Applied And Environmental Microbiology*, 79(14), 4253-4263. <https://doi.org/10.1128/aem.00840-13>
- Johnson, C. W., Salvachúa, D., Khanna, P., Smith, H., Peterson, D. J., & Beckham, G. T. (2016). Enhancing muconic acid production from glucose and lignin-derived aromatic compounds via increased protocatechuate decarboxylase activity. *Metabolic Engineering Communications*, 3, 111-119. <https://doi.org/10.1016/j.meteno.2016.04.002>
- Johnston, B., Jiang, G., Hill, D., Adamus, G., Kwiecień, I., Zięba, M., Sikorska, W., Green, M., Kowalczyk, M., & Radecka, I. (2017). The Molecular Level Characterization of Biodegradable Polymers Originated from Polyethylene Using Non-Oxygenated Polyethylene Wax as a Carbon Source for Polyhydroxyalkanoate Production. *Bioengineering*, 4(3), 73. <https://doi.org/10.3390/bioengineering4030073>
- Johnston, B., Radecka, I., Chiellini, E., Barsi, D., Ilieva, V. I., Sikorska, W., Musioł, M., Zięba, M., Chaber, P., Marek, A. A., Mendrek, B., Eke-re, A. I., Adamus, G., & Kowalczyk, M. (2019). Mass Spectrometry Reveals Molecular Structure of Polyhydroxyalkanoates Attained by Bioconversion of Oxidized Polypropylene Waste Fragments. *Polymers*, 11(10), 1580. <https://doi.org/10.3390/polym11101580>
- Kambourakis, S., Draths, K. M., & Frost, J. W. (2000). Synthesis of Gallic Acid and Pyrogallol from Glucose: Replacing Natural Product Isolation with Microbial Catalysis. *Journal Of The American Chemical Society*, 122(37), 9042-9043. <https://doi.org/10.1021/ja000853r>
- Kenny, S. T., Runic, J. N., Kaminsky, W., Woods, T., Babu, R. P., Keely, C. M., Blau, W., & O'Connor, K. E. (2008). Up-Cycling of PET (Polyethylene Terephthalate) to the Biodegradable Plastic PHA (Polyhydroxyalkanoate). *Environmental Science & Technology*, 42(20), 7696-7701. <https://doi.org/10.1021/es801010e>
- Kenny, S. T., Runic, J. N., Kaminsky, W., Woods, T., Babu, R. P., & O'Connor, K. E. (2012). Development of a bioprocess to convert PET derived terephthalic acid and biodiesel derived glycerol to medium chain length polyhydroxyalkanoate. *Applied Microbiology And Biotechnology*, 95(3), 623-633. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-4058-4>
- Kim, H. T., Kim, J. K., Cha, H. G., Kang, M. J., Lee, H. S., Khang, T. U., Yun, E. J., Lee, D., Song, B. K., Park, S. J., Joo, J. C., & Kim, K.

- H. (2019). Biological Valorization of Poly(ethylene terephthalate) Monomers for Upcycling Waste PET. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(24), 19396-19406. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b03908>
- Kraeling, MEK y Bronaugh, RL (1996). *In vitro percutaneous absorption of an alpha hydroxy acid(glycolic acid) in human skin*. Article Information | J-GLOBAL. https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=200902130175601310
- Kube, P., Dong, J., Bastardo, N. S., Ruland, H., Schlögl, R., Margraf, J. T., Reuter, K., & Trunschke, A. (2022). Green synthesis of propylene oxide directly from propane. *Nature Communications*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34967-2>
- Kunjapur, A. M., Hyun, J. C., & Prather, K. L. J. (2016). Deregulation of S-adenosylmethionine biosynthesis and regeneration improves methylation in the E. coli de novo vanillin biosynthesis pathway. *Microbial Cell Factories*, 15(1). <https://doi.org/10.1186/s12934-016-0459-x>
- Letcher, T. (2020). *Plastic Waste and Recycling: Environmental Impact, Societal Issues, Prevention, and Solutions*. Academic Press.
- Li, Z., Zhang, C., Wang, K., & Gu, L. (1999). Changes in the pulmonary function of factory workers exposure to terephthalic acid. *Wei Sheng Yan Jiu*, 28(1), 1-3. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12712733>
- Li, K., & Frost, J. W. (1998). Synthesis of Vanillin from Glucose. *Journal Of The American Chemical Society*, 120(40), 10545-10546. <https://doi.org/10.1021/ja9817747>
- Liu, P., Zhang, T., Zheng, Y., Li, Q., Su, T., & Qi, Q. (2021). Potential one-step strategy for PET degradation and PHB biosynthesis through co-cultivation of two engineered microorganisms. *Engineering Microbiology*, 1, 100003. <https://doi.org/10.1016/j.engmic.2021.100003>
- Luciani-Torres, M. G., Moore, D. H., Goodson, W. H., & Dairkee, S. H. (2014). Exposure to the polyester PET precursor—terephthalic acid induces and perpetuates DNA damage-harboring non-malignant human breast cells. *Carcinogenesis*, 36(1), 168-176. <https://doi.org/10.1093/carcin/bgu234>
- McKeen, L. W. (2013). Introduction to Plastics and Polymers Compositions. En *Elsevier eBooks* (pp. 1-16). <https://doi.org/10.1016/b978-1-4557-2851-0.00001-3>

- Mihreteab, M., Stubblefield, B. A., & Gilbert, E. S. (2019). Microbial bioconversion of thermally depolymerized polypropylene by *Yarrowia lipolytica* for fatty acid production. *Applied Microbiology And Biotechnology*, 103(18), 7729-7740. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-09999-2>
- Miranda, R., Yang, J., Roy, C., & Vasile, C. (2001). Vacuum pyrolysis of commingled plastics containing PVC I. Kinetic study. *Polymer Degradation And Stability*, 72(3), 469-491. [https://doi.org/10.1016/s0141-3910\(01\)00048](https://doi.org/10.1016/s0141-3910(01)00048)
- Narancic, T., Salvador, M., Hughes, G. M., Beagan, N., Abdulmutalib, U., Kenny, S. T., Wu, H., Saccomanno, M., Um, J., O'Connor, K. E., & Jiménez, J. I. (2021). Genome analysis of the metabolically versatile *Pseudomonas umsongensis* GO16: the genetic basis for PET monomer upcycling into polyhydroxyalkanoates. *Microbial Biotechnology*, 14(6), 2463-2480. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13712>
- Peña Núñez, Álvaro (2016). *Estudio tecno-económico del bioproceso de producción de ácido adípico*. [Tesis Fin de Grado, E.T.S.I. Industriales (UPM)]. <https://oa.upm.es/43961/>
- Polen, T., Spelberg, M., & Bott, M. (2012). Toward biotechnological production of adipic acid and precursors from biorenewables. *Journal Of Biotechnology*, 167(2), 75-84. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2012.07.008>
- Plastics Europe. (2021). *Plastics - the Facts 2021 • Plastics Europe*. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021/>
- Plastics Europe. (2023). *Plastics – the fast Facts 2023 • Plastics Europe*. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/>
- Qi, X., Yan, W., Cao, Z., Ding, M., & Yuan, Y. (2021). Current Advances in the Biodegradation and Bioconversion of Polyethylene Terephthalate. *Microorganisms*, 10(1), 39. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10010039>
- Shi, Y., Cui, L., Dai, G., Chen, J., Pan, H., Song, L., Cheng, S., & Wang, X. (2006). Elevated prostaglandin E2 level via cPLA2–COX-2–mPGES-1 pathway involved in bladder carcinogenesis induced by terephthalic acid-calculi in Wistar rats. *Prostaglandins Leukotrienes And Essential Fatty Acids*, 74(5), 309-315. <https://doi.org/10.1016/j.plefa.2006.02.005>

- Wang, J., Shen, X., Wang, J., Yang, Y., Yuan, Q., & Yan, Y. (2018). Exploring the Promiscuity of Phenol Hydroxylase from *Pseudomonas stutzeri* OX1 for the Biosynthesis of Phenolic Compounds. *ACS Synthetic Biology*, 7(5), 1238-1243. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.8b00067>
- Wang, Y., Yin, J., & Chen, G. (2014). Polyhydroxyalkanoates, challenges and opportunities. *Current Opinion In Biotechnology*, 30, 59-65. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2014.06.001>
- Wei, G., Yang, X., Gan, T., Zhou, W., Lin, J., & Wei, D. (2009a). High cell density fermentation of *Gluconobacter oxydans* DSM 2003 for glycolic acid production. *Journal Of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 36(8), 1029-1034. <https://doi.org/10.1007/s10295-009-0584-1>
- Wei, G., Yang, X., Zhou, W., Lin, J., & Wei, D. (2009). Adsorptive bioconversion of ethylene glycol to glycolic acid by *Gluconobacter oxydans* DSM 2003. *Biochemical Engineering Journal*, 47(1-3), 127-131. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2009.07.016>
- Werner, A. Z., Clare, R., Mand, T. D., Pardo, I., Ramirez, K. J., Haugen, S. J., Bratti, F., Dexter, G. N., Elmore, J. R., Huenemann, J. D., Peabody, G. L., Johnson, C. W., Rorrer, N. A., Salvachúa, D., Guss, A. M., & Beckham, G. T. (2021). Tandem chemical deconstruction and biological upcycling of poly(ethylene terephthalate) to β -ketoadipic acid by *Pseudomonas putida* KT2440. *Metabolic Engineering*, 67, 250-261. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2021.07.005>
- Williams, P. T., & Slaney, E. (2007). Analysis of products from the pyrolysis and liquefaction of single plastics and waste plastic mixtures. *Resources Conservation And Recycling*, 51(4), 754-769. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.12.002>
- Zhao, X., Korey, M., Li, K., Copenhaver, K., Tekinalp, H., Celik, S., Kalaitzidou, K., Ruan, R., Ragauskas, A. J., & Ozcan, S. (2021). Plastic waste upcycling toward a circular economy. *Chemical Engineering Journal*, 428, 131928. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131928>

