

# **Tereftalato de polietileno de desecho (PET), su modificación mediante radiación gamma y sus diversos usos**

**Mtro. Joel Olaf Camacho Gutiérrez**

Universidad Autónoma del Estado de México

**Dr. Gonzalo Martínez Barrera**

Universidad Autónoma del Estado de México

**Abstract**

The volume of plastic waste continues to increase each year, along with its accumulation and detrimental impact on the environment. As a result, several recycling processes have been developed to address the issue. However, the limitations of current methods highlight the urgent need to explore and adopt alternative solutions. One such promising approach is the use of gamma radiation. In recent years, gamma radiation has gained relevance due to its ability to modify and improve the physical and chemical properties of materials. For this reason, this article describes several investigations focused on the application of gamma radiation for the modification and reuse of PET waste.

**Keywords:** Polyethylene terephthalate waste, gamma radiation, waste management, physicochemical properties.

**Resumen**

La cantidad de desechos plásticos aumenta año con año y se incrementa su acumulación e impacto en el medio ambiente, razón por la cual se han ido desarrollado diversos procesos de reciclaje. No obstante, la naturaleza y las limitaciones propias de los procedimientos empleados han demostrado la urgencia de buscar y adoptar procesos alternativos. Entre los procesos novedosos, se encuentra el que involucra el uso de la radiación gamma. El cual ha adquirido relevancia en los últimos años, ya que tiene la capacidad de modificar y mejorar las propiedades físicas y químicas. Por esta razón en este artículo se describen diversas investigaciones sobre el uso de la radiación gamma en la modificación y

reaprovechamiento del PET de desecho.

**Palabras clave:** Tereftalato de polietileno de desecho, radiación gamma, disposición de desechos, propiedades físicas y químicas.

**Introducción**

Al igual que muchos otros productos elaborados con plástico, los artículos fabricados con Tereftalato de Polietileno (PET) son desechados por el consumidor una vez que se termina su vida útil. Pueden terminar depositados en los ecosistemas marinos o terrestres, perjudicando la vida de las criaturas que los habitan. El uso del PET sigue en aumento, por lo que se han buscado medidas que ayuden a reducir, disponer y reutilizar de manera eficiente su uso. Aparte del incremento en el número de rellenos sanitarios, se han desarrollado diferentes tipos de reciclamiento (primario, secundario, terciario o cuaternario), como se muestra en la figura 1 (Bhanderi, 2023).

No obstante, estos procesos cuentan con inconvenientes que limitan su uso. Por ejemplo, los rellenos sanitarios pueden afectar la calidad del aire, la tierra y las aguas subterráneas. En los procesos de reciclaje primario y secundario, puede suceder el rompimiento de cadena en las estructuras poliméricas; lo cual afecta las propiedades e imposibilitan su uso en la fabricación de nuevos productos. En los procesos de reciclaje terciario ocurren reacciones químicas que pueden emitir sustancias tóxicas. Mientras que en el reciclaje cuaternario se pueden producir emisiones gaseosas, polvo y cenizas, que impactan al medio ambiente (Alqassin, 2021; Bhanderi, 2023).

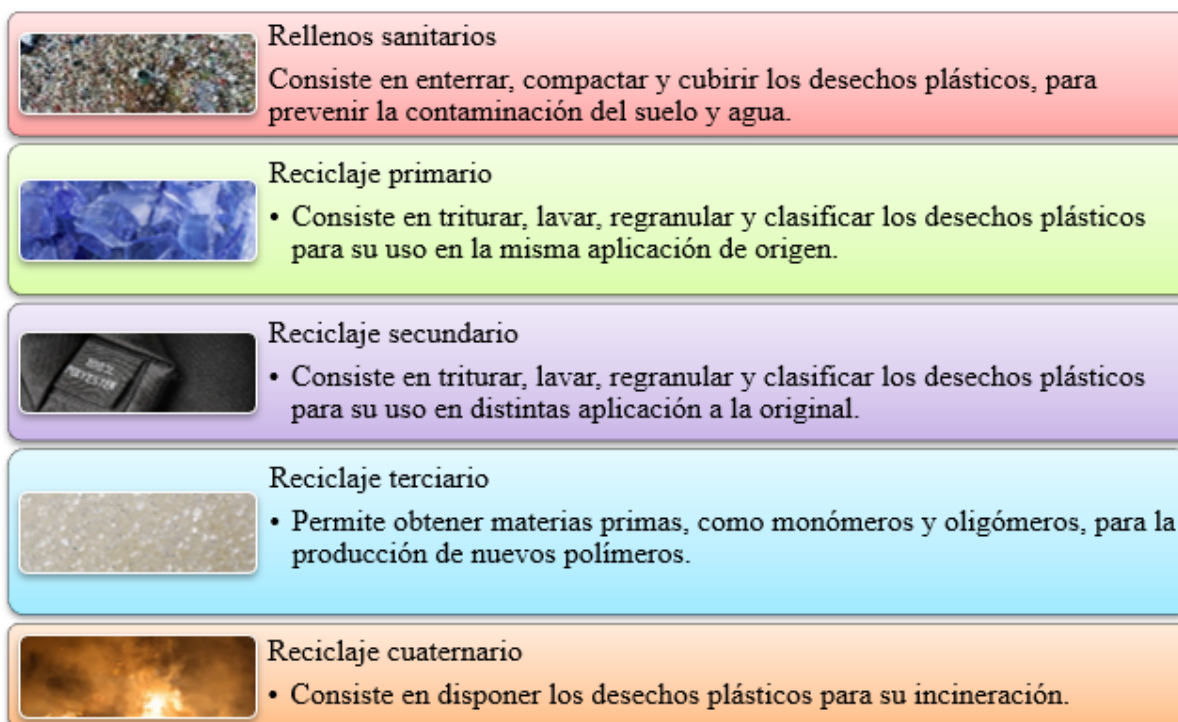


Figura 1: Procesos empleados a escala industrial para el control de desechos plásticos. Elaborado a partir de Bhanderi (2023).

Teniendo en cuenta estas desventajas, algunas investigaciones han optado por explorar técnicas o procedimientos alternativos de reciclaje, que permitan mayor aprovechamiento de los desechos plásticos.

En este sentido, en los últimos años la radiación gamma se ha vuelto

popular debido a los efectos que puede producir en los plásticos; entre los que se encuentran, la ionización de las moléculas, así como el rompimiento, entrecruzamiento o injerto de las cadenas poliméricas que conforman los plásticos (Lee, 2021; Schaefer, 2018).

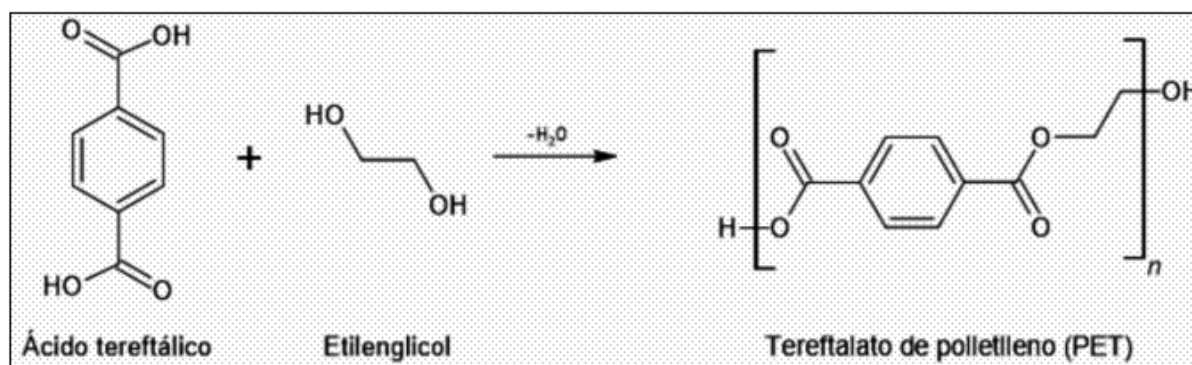


Figura 2: Estructura química y proceso de síntesis del PET. Elaboración propia.

## ¿Qué son los plásticos?

Los plásticos son un tipo de materiales poliméricos, que a lo largo de décadas se han utilizado en diversas aplicaciones, debido a su gran versatilidad de procesamiento y bajo costo. Debido a las propiedades con las que cuentan los plásticos, se ha logrado que numerosas industrias (la automotriz, electrónica, eléctrica, de la construcción y del empaque), produzcan un sinnúmero de productos (Bhanderi, 2023).

## ¿Qué es el tereftalato de Polietileno?

El Tereftalato de Polietileno (PET) es un termoplástico, que se obtiene mediante el proceso de polimerización por condensación del ácido tereftálico y el etilenglicol (ver figura 2). El PET es de los plásticos más utilizados a nivel mundial. Debido a sus características físicas y químicas, se utiliza mayormente en la elaboración de textiles y contenedores. De la producción total de PET, se estima que un 60% se destina para la manufactura de fibras sintéticas, mientras que un 30% para la elaboración de envases para bebidas (Bhanderi, 2023).

## ¿Qué es la radiación gamma?

La radiación gamma es un tipo de radiación electromagnética ionizante que se emite desde el núcleo atómico excitado de átomos inestables (radionúclidos) durante su desintegración radioactiva. En este proceso, el núcleo se reconfigura asimismo y libera energía para alcanzar un estado más estable (de menor energía). Los rayos gamma son paquetes de energía electromagnética (fotones), que tienen energía que oscila entre los diez mil y 10 millones de electrón-volts (eV). Además, todos los rayos gamma emitidos por un isótopo radioactivo

tienen la misma energía, no generan residuos y no inducen radiactividad en los materiales con los que entran en contacto (Drobny, 2012).

La radiación gamma tiene una mayor capacidad de penetración en la materia si se compara con la que tienen las partículas alfa y beta. La radiación ionizante genera la formación de iones y electrones, la cual se lleva a cabo a través de tres procesos principales: la dispersión de Compton, el efecto fotoeléctrico y la producción de pares (Drobny, 2012).

La dosis de radiación, que corresponde a la cantidad de energía ionizante absorbida por una unidad de masa de material, durante el proceso de irradiación, se mide en Gray (Gy). Un Gy se define como un joule por kilogramo (J/Kg). En aplicaciones prácticas, se suelen utilizar mil Grays, es decir kGy. También se suele utilizar el rad (radiation absorbed dose, por sus siglas en inglés); 100 rad equivalen a 1 Gy. Existen otras unidades de radiación: Curie (Ci), Becquerel (Bq), Roentgen (R), Coulomb/kg (C/kg), rem (rem) y Sievert (Sv), que se emplean en diversas aplicaciones. Las dosis de radiación gamma utilizadas en diversas aplicaciones varían entre menos de un 1 Gy y 30 Gy, como se muestra en la figura 3 (Drobny, 2012).

En los polímeros, la radiación gamma actúa principalmente a través de los efectos de Compton y fotoeléctrico, generando ionizaciones y electrones secundarios. Dependiendo de la tasa de dosis de radiación, así como de la presencia de oxígeno y antioxidantes, se pueden producir tres efectos primordiales: 1) El rompimiento de los enlaces covalentes en las cadenas poliméricas; 2) el entrecruzamiento de



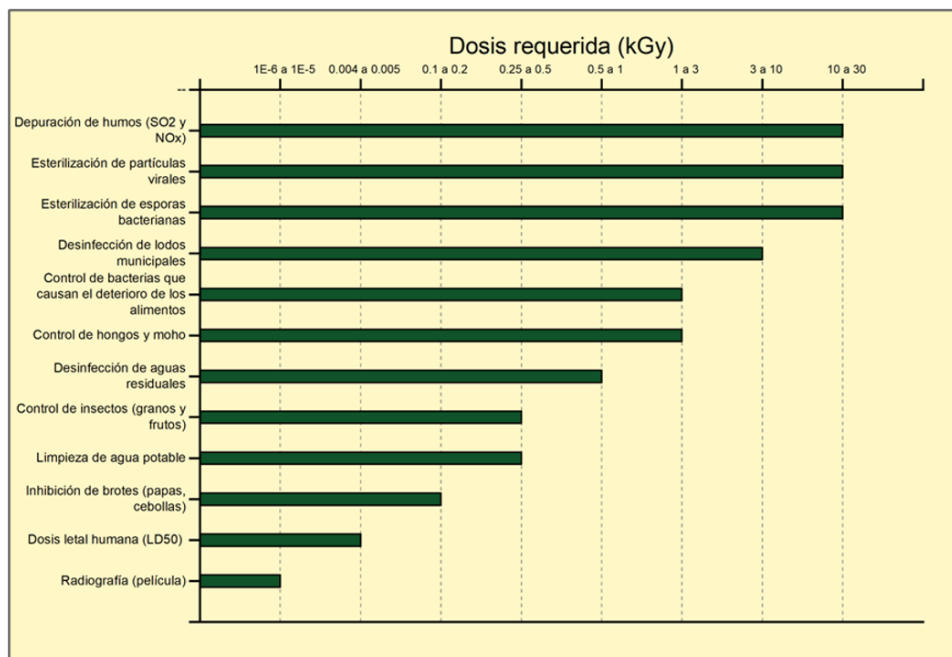


Figura 3: Dosis de radiación gamma requeridas en diversas aplicaciones. Elaboración propia a partir de Drobný (2012)

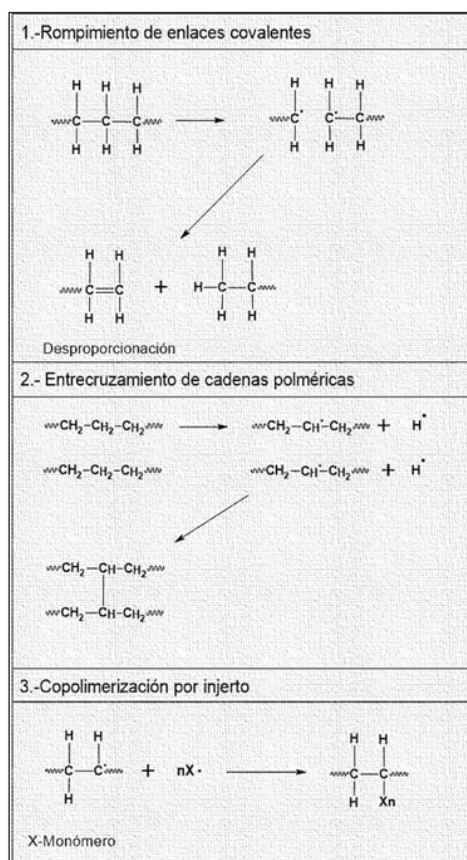


Figura 4: Cambios estructurales en los polímeros producidos por la radiación gamma. Elaboración propia a partir de Drobný (2012); Lubna (2018); Rao (2009).

cadenas poliméricas, a través de enlaces covalentes, lo que favorece la formación de redes tridimensionales; y 3) la copolimerización por injerto, en la cual los monómeros se polimerizan en la vecindad de un polímero preexistente, creando cadenas laterales a lo largo de la cadena principal del polímero. Estos efectos pueden observarse en la figura 4 (Drobny, 2012; Lubna, 2018; Rao, 2009).

Los efectos de la radiación gamma en los polímeros, que incluyen el rompimiento, el entrecruzamiento y el injerto, dependen tanto de las características estructurales del polímero como de la dosis de radiación aplicada. En este sentido, los polímeros pueden ser

clasificados en dos grupos: a) los que se presenta el entrecruzamiento de cadenas poliméricas, y b) los que presentan el rompimiento de estas (Tabla. 1). El rompimiento de las cadenas poliméricas genera la formación de gases, la aparición de fragmentos de bajo peso molecular y enlaces insaturados, además de incrementar el grado de cristalinidad. Por otro lado, el entrecruzamiento de las cadenas poliméricas puede reducir la movilidad de las estructuras poliméricas, afectando su flexibilidad y comportamiento mecánico. En contraste, la copolimerización por injerto mejora las propiedades de los polímeros sin afectar sus características intrínsecas (Drobny, 2012; Lubna, 2018; Rao, 2009).

Tabla 1: Clasificación de polímeros según su respuesta al entrecruzamiento o el rompimiento de cadenas poliméricas. Elaboración propia a partir de Drobny (2012).

<b>Polímeros que presentan entrecruzamiento</b>	<b>Polímeros que presentan rompimiento</b>
Polietileno (PE)	Politetrafluoroetileno (PTFE)
Polipropileno (PP)	Poli(alfa-metilestireno) (PAMS)
Poliestireno (PS)	Policloruro de vinilideno (PVDC)
Policloruro de vinilo (PVC)	Polifluoruro de vinilo (PVF)
Alcohol polivinílico (PVA)	Policlorotrifluoroetileno (PCTFE)
Acetato de polivinilo (PVAc)	Poliacrilonitrilo (PAN)
Poli (vinil metil éter) (PVME)	Polivinil butiral (PVB)
Polibutadieno (PB)	Polimetacrilato de metilo (PMMA)

*Continúa en la siguiente página*

<b>Polímeros que presentan entrecruzamiento</b>	<b>Polímeros que presentan rompimiento</b>
Hule natural (NR)	Polimetacrilonitrilo
Policloropreno (Neopreno)	Polioximetileno (POM)
Copolímero de estireno-acrilonitrilo (SAN)	Polisulfuro de polipropileno
Polietileno clorado (CPE)	Polisulfuro de etileno
Polietileno clorosulfonado (CSPE)	Celulosa
Poliámidas (PA)	Polialanina
Poliésteres	Polilisina
Poliuretanos (PU)	Polisobutileno (PIB)
Polisulfonas (PSU)	
Poliacrilatos	
Poliacrilamidas (PAMs)	
Polidimetilsiloxano (PDMS)	
Resinas fenol formaldehído (PF)	
Resinas urea formaldehído (UF)	
Resinas melamina formaldehído (MF)	

*Fin de la tabla*

Para cada polímero existe una dosis máxima, a partir de la cual los procesos de rompimientos o entrecruzamientos de cadena poliméricas, así como de injerto, mejoran sus propiedades. No obstante, a dosis elevadas de radiación, los polímeros experimentan degradación (Drobny, 2012; Rao, 2009).

Las dosis de radiación gamma comúnmente usadas para el tratamiento

de polímeros oscilan entre 100 Gy y 100 kGy. Dosis más altas se destinan para aplicaciones específicas. Las dosis más bajas suelen emplearse en procesos de copolimerización por injerto, polimerización de monómeros o curado de recubrimientos y adhesivos. En la figura 5 se muestran las dosis requeridas para producir diversos procesos en los polímeros.

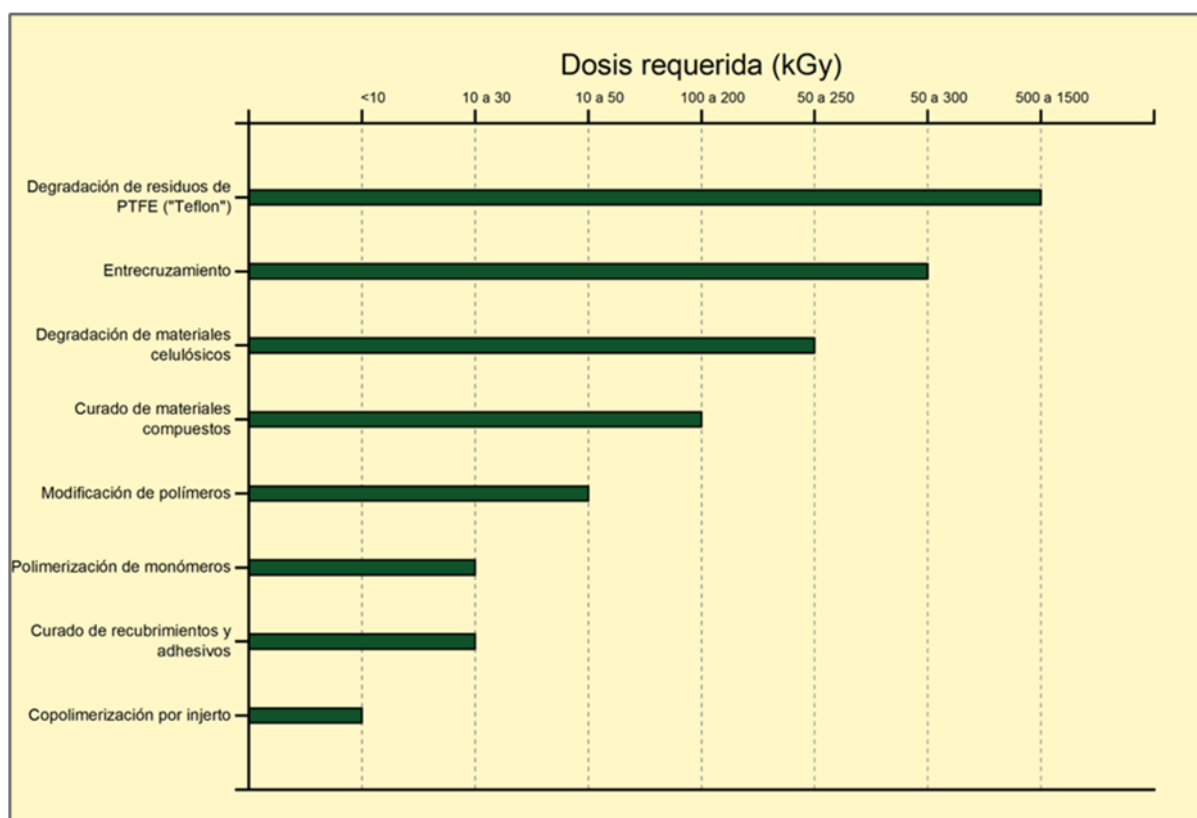


Figura 5: Dosis de radiación gamma requerida para producir diversos efectos en polímeros. Elaboración propia a partir de Drobny (2012); Rao (2009)

En algunas investigaciones sobre polímeros de desecho, se ha empleado la radiación gamma. En estas se han contemplado la optimización de propiedades, la obtención de materias primas y el desarrollo de nuevos materiales (Figura 6). Por ejemplo, mediante el entrecruzamiento de las cadenas poliméricas y la modificación superficial de los polímeros se han podido mejorar sus propiedades

mecánicas. A través del rompimiento de cadenas poliméricas, se ha logrado acelerar la desintegración de polímeros, produciendo materiales de bajo peso molecular, los cuales pueden utilizarse como aditivos o materias primas en la elaboración de nuevos productos. La radiación gamma ha contribuido al desarrollo de polímeros amigables con el medio ambiente (Jamdar, 2015; Schaefer, 2018; Usman, 2020; Zahid, 2024).



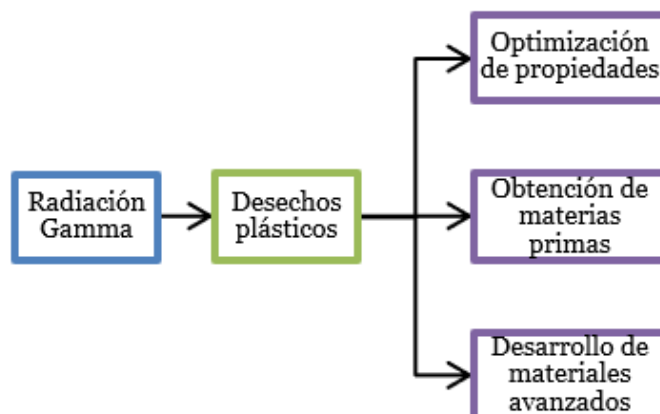


Figura 6: Aplicación de la radiación gamma en desechos plásticos. Elaboración propia a partir de Jamdar (2015); Schaefer (2018); Usman (2020); Zahid (2024).

### ¿Como ayuda la radiación gamma en la reutilización del PET de desecho?

Con el propósito de reincorporar el PET de desecho a la cadena productiva, en algunos estudios se ha evaluado el impacto de utilizarlo en la elaboración de materiales compuestos. Sin embargo, los productos elaborados con PET de desecho suelen presentar un rendimiento variado (Khan, 2022; Lee, 2021; Schaefer, 2018).

En vista de esto, la radiación gamma se presenta como una alternativa viable, eficiente y amigable con el medio ambiente, para mejorar el rendimiento del PET de desecho en la fabricación de nuevos compuestos. La interacción de la radiación gamma con el PET puede inducir el entrecruzamiento o el rompimiento de las cadenas que conforman su estructura polimérica. Estos efectos inciden en la movilidad molecular, la cristalinidad, el peso molecular, la resistencia química, el aislamiento térmico y eléctrico, así como en las propiedades mecánicas (resistencia mecánica, dureza, tenacidad y rigidez). El entrecruzamiento y rompimiento de las cadenas poliméricas

del PET mejorar su rendimiento. En comparación con otros polímeros, el PET es más resistente a la radiación gamma debido a la presencia de anillos aromáticos en su estructura química (Lee, 2021; Schaefer, 2018).

En las fuentes de información consultadas se encuentran diversos estudios sobre el uso de la radiación gamma en la modificación del tereftalato de polietileno de desecho (PET). Por ejemplo, en un estudio se menciona que el PET se expuso a dosis de radiación de 10, 30, 50, 70 y 100 kGy. Los efectos se manifestaron en la glicólisis del PET y en la obtención del monómero bis(2-hidroxietil) tereftalato, denominado como BHET, el cual es un compuesto orgánico, que se obtiene de la despolimerización del PET. La radiación produjo el rompimiento de las cadenas poliméricas, la formación de fragmentos más pequeños y la reducción del peso molecular. Se lograron reducir los tiempos de reacción de acuerdo la dosis de radiación aplicada. Por ejemplo, en PET sin irradiar se obtuvo cierta cantidad de BHET en cuatro horas de reacción, sin embargo, la misma cantidad de BHET se obtuvo en dos horas, pero irradiando el PET a una

dosis de 50 kGy (Jamdar *et al.*, 2015). El PET de desecho se ha reutilizado en diversas aplicaciones, como las que se

muestran en la Figura 7. Las cuales se describen a continuación.



Figura 7: Aplicaciones del PET de desecho sometido a la radiación gamma. Elaboración propia

Mediante el uso de la radiación gamma se han podido injertar polímeros en matrices de tereftalato de polietileno (PET), por ejemplo, Lubna *et al.*, 2018, injertaron monómero de vinil acetato (VAc) en películas de PET reciclado con el propósito de incrementar las propiedades mecánicas y térmicas. Los resultados muestran un aumento en la rigidez del PET cuando se agrega vinil acetato y se irradiada. Se obtuvo un 132.25 % de incremento en la resistencia a la flexión en películas con 15 % de vinil acetato e irradiadas a una dosis de 3 kGy. Sin embargo, la deformación a la ruptura disminuyó en 31.83 %. En el caso de las propiedades térmicas, los injertos presentan mayor estabilidad térmica, debido a que movilidad de moléculas disminuye a causa de la introducción de unidades monoméricas de vinil acetato en el PET. La descomposición del injerto acontece a los 95°C, mayor a la temperatura a la cual se descompone el PET.

En el caso del uso de PET de desecho como dosímetros, se produjeron películas con PET, las cuales fueron irradiadas a dosis de 150, 300, 400

y 670 kGy. La radiación generó entrecruzamiento de las cadenas poliméricas y empaquetamiento de estas en ciertas regiones, esto aumento la cristalinidad de las películas. Las propiedades de los dosímetros se relacionan tanto con la longitud de onda como con la energía detectadas. En las películas irradiadas a una dosis de 670 kGy, los picos en el espectro UV-vis se observaron a grandes longitudes de onda, mientras que el gap óptico se detectó a energías menores (Kumar, 2012).

En el caso de los pavimentos asfálticos, en un estudio se prepararon mezclas con 5, 10, 15 y 20 % de hojuelas de tereftalato de polietileno de desecho al asfalto. Las mezclas asfálticas se calentaron hasta los 155°C, con la finalidad de que el PET se reblandeciera y tuviera mayor interacción con el aglomerante. Como se sabe, el PET se funde a temperaturas entre 240 y 260°C. Los resultados muestran que mezclas asfálticas con 10 % de hojuelas tuvieron mayor rigidez y resistencia al ahuellamiento, es decir mayor ondulación en la superficie. Mas aún, los asfaltos expuestos a una dosis de 100 kGy presentaron

mayores rendimientos mecánicos, esto fue debido a las modificaciones del PET (rompimiento de cadenas poliméricas e incremento de la rugosidad superficial) y a una mayor interacción con el aglomerante (Usman *et al.*, 2020).

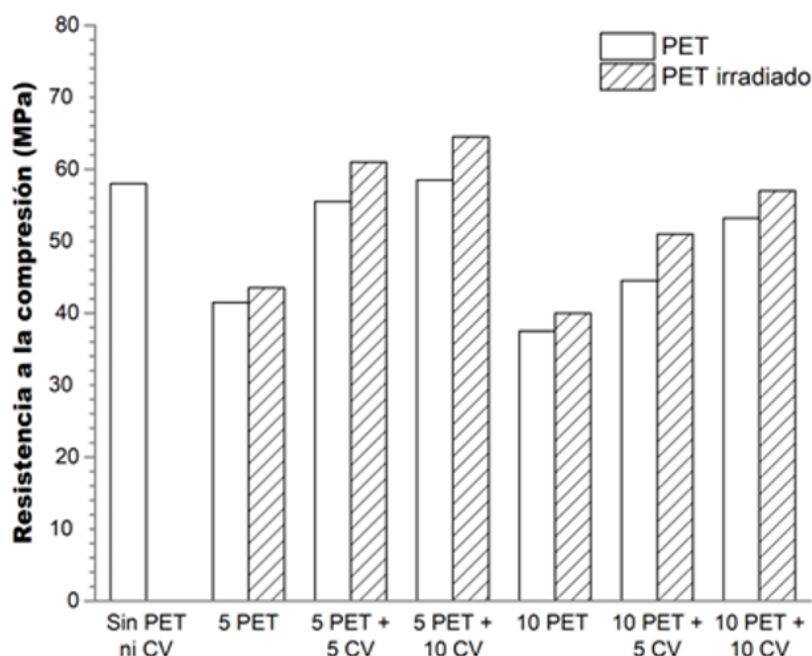


Figura 8: Resistencia a la compresión de pavimentos modificados con PET de desecho y ceniza volante, después de 28 días de curado. Elaborado a partir de Khan (2022)

El PET de desecho se ha utilizado en la elaboración de pavimentos semiflexibles. En un estudio, se elaboraron tres tipos de pavimentos modificados con diferentes materiales, los cuales se dejaron curar durante 28 días para alcanzar la dureza requerida. El primer tipo de pavimento fue modificado con cemento Portland; el segundo tipo fue modificado con la mezcla de 5 y 10 % de PET de desecho, ceniza volante (CV) y cemento Portland, mientras que el tercer tipo con ceniza volante, cemento Portland y PET irradiado a una dosis de 100 kGy. Los resultados se muestran en la Figura 8. Se observa que el pavimento modificado solo con cemento presenta una resistencia a compresión de 58 MPa. Mientras que los pavimentos modificados con la mezcla de cemento, PET de desecho y ceniza volante, disminuyeron sus resistencias

hasta en un 46%. Sin embargo, los pavimentos modificados con la mezcla de PET de desecho irradiado, ceniza volante y cemento tuvieron mayor resistencia, 65 MPa, lo que significó un incremento del 12%. La radiación gamma modifica el área superficial e incrementa la cristalinidad del PET, lo cual mejora la interacción con los aglomerantes y hace del PET, un material de refuerzo efectivo. En el caso de la resistencia a la flexión, se obtuvieron mejores resultados, ya que las resistencias de pavimentos modificados con PET y ceniza volante disminuyeron hasta en un 13%, mientras que los pavimentos con PET irradiado y ceniza volante, la disminución fue solo del 5 % (Khan, 2022).

En la preparación del concreto, el PET irradiado se ha utilizado para

mejorar las propiedades mecánicas. La adición del PET produce disminución del peso y de las propiedades mecánicas del concreto, específicamente en las resistencias a la tensión, flexión y compresión. Sin embargo, el uso de la radiación gamma ha permitido minimizar estas pérdidas (Lee, 2021). Por ejemplo, Schaefer *et al.*, 2018, añadieron 1.25% de PET irradiado a dosis de 10 y 100 kGy al concreto elaborado con cemento Portland. Los resultados mostraron 20% de aumento en la resistencia a la compresión de concreto con PET irradiado a 100 kGy, esto se debió a las modificaciones del PET producidas por la radiación gamma, que consistieron en el aumento de la cristalinidad y la disminución de la porosidad.

También se ha utilizado el PET de desecho en la elaboración de geopolímeros, es decir materiales inorgánicos que se obtienen a partir de la activación de minerales naturales, desechos o subproductos industriales. Zahid *et al.*, (2024) elaboraron geopolímeros utilizando ceniza volante (CV), micro-sílice, nano-plaquetas de grafeno, fibras de alcohol polivinilo y 25% de PET de desecho. Este último se irradió a 100 kGy. En geopolímeros con PET, la resistencia a la compresión disminuyó 7.3%, mientras que en geopolímeros con PET irradiado se incrementó 13%. En el caso de la resistencia a la flexión, se incrementó 9.3% en geopolímeros con PET irradiado. Estos aumentos se debieron a una mayor interacción del PET los materiales del geopolímero, generada por el aumento de la cristalinidad y rugosidad de las partículas de PET producida por la radiación gamma.

## Conclusiones

Cada año se genera una gran cantidad

de desechos de PET, y las limitaciones de los procesos actuales para su control y reutilización, hacen evidente la necesidad de adoptar estrategias alternativas. Dentro de las opciones que han sido poco estudiadas, se encuentra la radiación gamma, una técnica con la habilidad de modificar y optimizar las propiedades del PET. Lo cual podría permitir su uso en la fabricación materias primas y materiales avanzados en diferentes sectores de la industria. El tratamiento de los desechos plásticos con radiación gamma no solo ha contribuido al cuidado del medio ambiente, sino que ha permitido la creación de materiales con valor añadido. Se sugiere en futuros estudios, investigaciones sobre el uso del PET irradiado en la fabricación de novedosos materiales, especialmente aquellos que incorporen residuos de distinta naturaleza.

## Referencias

- [1] Alqassim, A.Y. (2021). Environmental health impacts of municipal solid waste landfilling and incineration in different health systems: A review. *Hail Journal of Health Sciences*, 3 (1), 13-24. <https://doi.org/10.4103/1658-8312.347572>
- [2] Bhandari, K.K., Joshi, J.R., & Patel, J.V. (2023). Recycling of polyethylene terephthalate (PET or PETE) plastics—An alternative to obtain value added products: A review. *Journal of the Indian Chemical Society*, 100 (1), 100843. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100843>
- [3] Drobny, J. G. (2012). *Fundamentals of Radiation Chemistry and Physics* (Ed.: J.G. Drobny), William Andrew Publishing, 11-26. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-7881-2.00002-X>

- [4] Jamdar, V., Kathalewar, M., Jagtap, R.N., Dubey, K.A., & Sabnis, A. (2015). Effect of Y-irradiation on glycolysis of PET waste and preparation of ecofriendly coatings using bio-based and recycled materials. *Polymer Engineering & Science*, 55(11), 2653-2660. <https://doi.org/10.1002/pen.24158>
- [5] Khan, M.I., Sutanto, M.H., Napiah, M.B., Zoorob, S.E., Yusoff, N.I.M., Usman, A., & Memon, A.M. (2022). Irradiated polyethylene terephthalate and fly ash based grouts for semi-flexible pavement: Design and optimisation using response surface methodology. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(8), 2515-2530. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1861446>
- [6] Kumar, V., Ali, Y., Sonkawade, R.G., & Dhaliwal, A.S. (2012). Effect of gamma irradiation on the properties of plastic bottle sheet. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 287, 10-14. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2012.07.007>
- [7] Lubna, M.M., Salem, K.S., Sarker, M., & Khan, M.A. (2018). Modification of thermo-mechanical properties of recycled PET by vinyl acetate (VAc) monomer grafting using gamma irradiation. *Journal of Polymers and the Environment*, 26, 83-90. <https://doi.org/10.1007/s10924-016-0922-0>
- [8] Lee, H., Cheon, H., Kang, Y., Roh, S., & Kim, W. (2021). State-of-the-art modification of plastic aggregates using gamma irradiation and its optimization for application to cementitious composites. *Applied Sciences*, 11(21), 10340. <https://doi.org/10.3390/app112110340>
- [9] Rao, V. (2009). Radiation processing of polymers. *Advances in polymer processing*, 402-437. <https://doi.org/10.1533/9781845696429.3.402>
- [10] Schaefer, C.E., Kupwade-Patil, K., Ortega, M., Soriano, C., Büyüköztürk, O., White, A.E., & Short, M.P. (2018). Irradiated recycled plastic as a concrete additive for improved chemo-mechanical properties and lower carbon footprint. *Waste management*, 71, 426-439. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.033>
- [11] Usman, A., Sutanto, M. H., Napiah, M., Zoorob, S.E., Khan, M.I., & Ibrahim, M.B. (2020). Application of gamma irradiation on Polyethylene Terephthalate (PET) for use in asphaltic concrete mixtures as aggregates replacement. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 498 (1) 012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/498/1/012008>
- [12] Zahid, M., Abbas, Y.M., Shafiq, N., Khan, M.I., & Ismail, F.I. (2024). Sustainable engineered geopolymer composites utilizing gamma-irradiated PET and graphene nanoplatelets: Optimization and performance enhancement. *Sustainability*, 16 (17) 7455. <https://doi.org/10.3390/su16177455>