



INGENIERÍA AMBIENTAL

ESTUDIO DE LA DEGRADACIÓN DE EMPAQUES PLÁSTICOS DE PRODUCTOS ALIMENTICIOS DEL TIPO PET Y PE A TRAVÉS DE RECICLAJE BIOLÓGICO

MARIANA DUSSÁN CÁRDENAS

ANDRÉS ALBERTO GARCÍA VILLEGAS



Universidad[®]
Católica
de Manizales

VIGILADA Mineducación

Obra de Iglesia
de la Congregación



Hermanas de la Caridad
Dominicanas de La Presentación
de la Santísima Virgen

ESTUDIO DE LA DEGRADACIÓN DE EMPAQUES PLÁSTICOS DE PRODUCTOS ALIMENTICIOS DEL TIPO PET Y PE A TRAVÉS DE RECICLAJE BIOLÓGICO

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Pregrado en Ingeniería Ambiental

Investigador principal

Dra. CHRISTHY VANESSA RUIZ MADROÑERO

Coinvestigador

Dra. MAR LOPEZ-GONZÁLEZ

Asistentes de investigación

ANDRÉS ALBERTO GARCÍA VILLEGAS

MARIANA DUSSÁN CÁRDENAS

Línea de investigación

Saneamiento, Desarrollo y Gestión Ambiental

Grupo de Investigación – GIDTA

Universidad Católica de Manizales

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Manizales, Caldas

2022

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	12
2. Planteamiento del problema	13
3. Justificación	15
4. Objetivos	18
4.1 Objetivo general	18
4.2 Objetivo específico	18
5. Marco teórico	19
5.1 Definición, tipo y uso común de los plásticos	19
5.2 Variedad PE y PET como polímeros más usados en la industria alimenticia	21
5.3 Tereftalato de Polietileno (PET)	21
5.4 Polietileno (PE)	22
5.5 Alternativa de gestión de residuos plásticos	23
5.6 Enfoques y estrategias de reciclaje para el material plástico	24
5.6.1 Enfoque de ciclo de vida	24
5.6.2 Recuperación energética	25
5.6.3 Enfoque de reutilización	26
5.6.4 Reciclaje mecánico	26
5.6.5 Reciclaje químico	27
5.6.6 Reciclaje térmico	27
5.6.7 Reciclaje biológico	28
5.7 Proceso de biodegradación de plásticos	29
5.8 Substrato de pulpa de café	31

5.9 Técnicas de caracterización	32
5.9.1 Espectroscopia de infrarrojo (FT-IR)	32
5.9.2 Termogravimetría (TGA)	33
5.9.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM)	34
5.9.4 Análisis microbiológico de secuenciamiento profundo (NGS)	35
6. Metodología experimental	36
6.1 Material de ensayo	36
6.2 Diseño experimental	36
6.3 Preparación del compost	37
6.4 Puesta en marcha	38
6.5 Evaluación de la degradación	39
6.6 Espectroscopia de infrarrojo (FT-IR)	39
6.7 Termogravimetría (TGA)	40
6.8 Microscopia electrónica de barrido (SEM) y seguimiento de apariencia visual	40
6.9 Análisis microbiológico de secuenciamiento profundo (NGS)	40
7. Análisis y resultados	41
7.1 Evaluación de la degradación	41
7.2 Espectroscopia de infrarrojo (FT-IR)	43
7.3 Termogravimetría (TGA)	46
7.4 Microscopía electrónica de barrido (SEM) y seguimiento de apariencia visual	49
7.5 Análisis microbiológico de secuenciamiento profundo (NGS)	53

8. Conclusiones	57
9. Referencias	59

LISTA DE FIGURAS Y FÓRMULAS

Figura 1. Panorama general de la producción global de plásticos	15
Figura 2. Obtención del PET	22
Figura 3. Proceso obtención del PET en forma de envase	22
Figura 4. Proceso obtención del PE en forma de envase	24
Figura 5. Rutas de reciclaje y recuperación de residuos plásticos	25
Figura 6. Etapas de reciclaje mecánico	26
Figura 7. Mecanismo de degradación microbiana de los plásticos	29
Figura 8. Productos en la elaboración de café como bebida	32
Figura 9. Esquema de TGA	34
Figura 10. Seguimiento de peso de muestras plásticas en mg para PET y PE	42
Figura 11. Espectro FTIR de PET	45
Figura 12. Espectro FTIR de PE	45
Figura 13. Curva TGA y DTG del PET.....	47
Figura 14. Curva TGA y DTG del PE	48
Figura 15. Seguimiento SEM y Apariencia visual para PET	50
Figura 16. Seguimiento SEM y Apariencia visual para PE	52
Figura 17. Frecuencia de la asignación taxonómica a nivel de filo	54
Figura 18. Frecuencia de la asignación taxonómica a nivel de familia	54
Figura 19. Frecuencia de la asignación taxonómica a nivel de género	55
Fórmula 1. Grado de desintegración	39

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Plásticos más comunes con sus usos y aplicaciones	19
Tabla 2. Tipos de degradación en plásticos	24
Tabla 3. Disposición del experimento	37
Tabla 4. Composición del compost	38
Tabla 5. Promedio de desintegración (D) a través del tiempo	42
Tabla 6. Principales absorciones espectrales de los grupos funcionales de PET	44
Tabla 7. Principales absorciones espectrales de los grupos funcionales de PE	46

RESUMEN

La elevada producción de plástico, su derivación como residuo y las fuertes implicaciones que tiene sobre el ambiente y la salud humana han hecho que se comience a repensar las dinámicas de fabricación y el tratamiento de este material cuando ya es considerado residuo. Los plásticos son polímeros o moléculas de cadenas largas formadas por eslabones que se repiten, permitiéndole al material sus propiedades más importantes: plasticidad, ligereza, resistencia, durabilidad, flexibilidad y elasticidad; propiedades que a su vez han potenciado su consumo elevado y seguidamente su consecución como residuo, facilitando la acumulación en el medio ambiente durante cientos de años, causando graves problemas medioambientales. De allí que el tratamiento de los residuos plásticos es un paso importante hacia la transición de implementar estrategias de economía circular.

Sin embargo, es relevante considerar la amplia variabilidad de las características heterogéneas de los polímeros que limitan el potencial de aprovechamiento, haciendo que los procesos degradativos sean aún más complejos y sean necesarias más condiciones de pretratamiento. Una de las estrategias de aprovechamiento más estudiadas en la actualidad, por sus beneficios ambientales y económicos; es el reciclaje biológico. En este sentido, el tratamiento de residuos sólidos en compostaje controlado es un método valioso para reciclar material de envases plásticos como una forma de recuperación de residuos.

Considerando la alta producción de café en Colombia y la alta obtención de la pulpa como un subproducto con escaso valor comercial, pero un alto potencial de material orgánico que proporciona el medio adecuado en términos microbiológicos; en este estudio se explora la degradación o desintegración de los materiales plásticos utilizados en el envasado alimenticio (PET y PE) a través del compostaje utilizando pulpa de café como substrato esencial aplicando la norma ISO 20200:2015 como guía metodológica.

El análisis de apariencia visual muestra que en tiempos prolongados de exposición las muestras poliméricas cambian su transparencia adquiriendo un color opaco, lo que concuerda con las imágenes obtenidas por SEM, donde se aprecia adherencia del material del compost sobre la superficie de los polímeros. Los resultados de FTIR no proyectan grandes cambios en las estructuras químicas principales, al igual que no se evidencian cambios significativos en el análisis termogravimétrico que permita indicar algún tipo de descomposición del plástico por efectos del

tratamiento en compostaje con pulpa de café. La evaluación de la degradación presenta disminuciones en los primeros días de muestreo y un aumento después de 25 días de tratamiento por efectos de adherencia de material, evidenciando resultados más favorables para PET. Los resultados de estas técnicas sugieren que el reciclaje biológico puede convertirse en una alternativa viable si se explora en detalle variaciones a este estudio asociadas a los tiempos de contacto, pretratamiento de las muestras y condiciones operativas que permitan ver grandes cambios en la degradación del plástico.

Palabras clave: PET, PE, Compostaje, Pulpa de café, SEM, FTIR, TGA, degradación

ABSTRACT

The high production of plastic, its derivation as waste and the strong implications it has on the environment and human health have led to a rethinking of the dynamics of manufacturing and treatment of this material when it is already considered waste. Plastics are polymers or molecules of long chains formed by repeating links, allowing the material its most important properties: plasticity, lightness, strength, durability, flexibility, and elasticity; facilitating its accumulation in the environment for hundreds of years, causing serious environmental problems. The treatment of plastic waste is an important step towards the transition of implementing circular economy strategies.

However, it is relevant to consider the wide variability of the heterogeneous characteristics of polymers that limit the potential for utilization, making degradation processes even more complex and requiring more pre-treatment conditions. One of the most studied utilization strategies at present, due to its environmental and economic benefits, is biological recycling. In this sense, the treatment of solid waste in controlled composting is a valuable method for recycling plastic packaging material as a form of waste recovery.

Considering the high production of coffee in Colombia and the high obtaining of pulp as a by-product with little commercial value, but a high potential of organic material that provides the appropriate medium in microbiological terms; in this study we explore the degradation or disintegration of plastic materials used in food packaging (PET and PE) through composting using coffee pulp as a substrate using the ISO 20200:2015 standard as a methodological guide.

The visual appearance analysis shows that in prolonged exposure time the polymeric samples change their transparency acquiring an opaque colour, which agrees with the images obtained by SEM, where adhesion of the compost material on the surface of the polymers is appreciated. The FTIR results do not show major changes in the main chemical structures, as well as no significant changes in the thermogravimetric analysis that would indicate any type of decomposition of the plastic by the composting treatment with coffee pulp. The evaluation of degradation showed decreases in the first days of sampling and an increase after 25 days of treatment due to the effects of material adherence, showing more favourable results for PET. The results of these techniques suggest that biological recycling can become a viable alternative if variations to this study are

explored in detail, associated with contact times, sample pre-treatment and operating conditions that allow to see major changes in plastic degradation.

Keywords: PET, PE, Composting, Coffee pulp, SEM, FTIR, TGA, degradation

1. Introducción

El devenir de los plásticos como un grave problema ambiental de alcances globales ha suscitado el interés de los gobiernos y diferentes sectores científicos por encontrar una solución que permita atender de manera rápida y eficiente esta crisis ambiental de nuestro tiempo. Crisis que se acrecienta cuando los niveles de producción de este material vienen en aumento y eventos como la reciente pandemia por coronavirus (COVID-19) ha causado el uso obligatorio y desmedido de una cantidad exorbitante de plásticos que elevan las cifras de material residual plástico que llega principalmente a los mares y a vertederos.

Los plásticos a base de petróleo son particularmente un tipo de residuos difícil de degradar en condiciones ambientales normales dada sus propiedades de resistencia y durabilidad. Aunque la mayoría de los plásticos (PET, PE, PVS, PP, PS) son económicos, cada uno es un material de alta ingeniería con propiedades físicas precisas que permiten ser moldeadas prácticamente a cualquier forma que desee. La poca o nula degradabilidad de estos plásticos está asociada a la cantidad de aditivos y compuestos químicos utilizados en su fabricación que le aseguran su permanencia en el ambiente auspiciando serios problemas de contaminación y afectación sobre la salud de las personas y animales.

Los esfuerzos por atender este problema se han venido materializando desde hace algunas décadas, pero aún son insuficientes para responder al problema a escala global principalmente porque sus aplicaciones en la mayoría de los casos son muy costosas. El reciclaje se ha posicionado como una de las estrategias más importantes incluidas dentro de las agendas gubernamentales de muchos países como metas de mediano y largo alcance que logren disminuir considerablemente la cantidad de residuos plásticos que se generan a diario en el mundo. Por su parte, el reciclaje común en sus diferentes vertientes (químico, físico y térmico) aunque prometedor, la realidad es que sus aplicaciones no resultan ser fáciles dado los costos de inversión, operación y el pretratamiento que necesita el residuo plástico para ser reciclado por estos medios.

Otros esfuerzos por manejar este problema han puesto los ojos en formas alternativas de reciclaje centradas principalmente en procesos de bajo costo y con alto potencial eficiencia. Una de estas alternativas es el reciclaje biológico que ha tomado gran fuerza por su escasa o nula injerencia negativa sobre el medio ambiente y debido principalmente a que reduce la circulación de residuos plásticos hacia los vertederos, ahorra energía y permite que los residuos orgánicos que

carecen de valor comercial sean utilizados como sustrato esencial para la supervivencia de microorganismos que puedan ejercer efecto de degradación sobre los plásticos.

Este estudio se centró en determinar el grado de degradación de empaques plásticos de productos alimenticios tipo PET Y PE a través de reciclaje biológico utilizando la pulpa de café como sustrato esencial. La utilización de la pulpa de café en este estudio se sustenta a partir de la alta producción de café en la zona del eje cafetero y particularmente en el departamento de Caldas donde gran porcentaje de los suelos son destinados para uso agrícola destacando las plantaciones de café. Durante las etapas de cosecha la pulpa deriva como un subproducto con escaso valor comercial y que además debido a su alto volumen generación y posterior acumulación, tienen serios efectos contaminantes sobre el suelo y cuerpos de agua. Sin embargo; su alto contenido de materia orgánica lo hace un sustrato ideal para participar en sistemas de compostaje biológico.

2. Planteamiento del problema

Las dinámicas de producción y consumo con las que se sustentan las actividades cotidianas alrededor del mundo han hecho que el plástico se posicione como uno de los elementos más demandados por su practicidad y uso. Gracias a su versatilidad para ser fácilmente moldeable bajo calor o presión, este novedoso material revolucionó la industria, la cultura y la sociedad del siglo XX [1]. Los plásticos, a nivel molecular, son polímeros o moléculas de cadenas largas formadas por eslabones que se repiten; estas características le brindan al material sus propiedades más importantes que le distinguen en el mercado: plasticidad, ligereza, resistencia, durabilidad, flexibilidad y elasticidad; pero a su vez, lo convierten en un tipo de material que, a diferencia de otros como el papel o el acero, no se disuelve, no se oxida ni se descompone en un lapso de tiempo corto [2].

Son muchas las ventajas que se le otorgan a este material para aplicaciones prácticas, pero ha sido su uso desmedido, así como la mala gestión en su disposición y reúso, las que han causado un nivel de contaminación alarmante en el medio ambiente; lo que representa hoy un problema de interés mundial, no solo por las afectaciones sobre el paisaje, sino por su efecto sobre la salud de las personas y animales [3]. Los océanos se han convertido en el lugar donde reposa la mayor parte de la producción de plásticos de un solo uso, allí este material flota parcialmente en la superficie

mientras las corrientes marinas se encargan de distribuirlo, alcanzando incluso regiones polares [4].

El material plástico es capaz de pasar tiempos prolongados en condiciones medioambientales extremas, resistiendo a procesos de degradación que apenas logran fragmentarlo en partes muy pequeñas. Estos pequeños trozos de plástico dan lugar a lo que se conoce como microplásticos, convirtiéndose en un problema de mayor magnitud [1]. Se ha descubierto que las partículas de plástico dañan los pulmones y el intestino, cruzando la barrera hematoencefálica o la placenta humana, lo que provoca inflamación y daño a las células [5]. La interacción de los plásticos con las células se ha demostrado a través de la toxicidad química manifestada en vectores patógenos y parásitos, lo que quiere decir que el plástico es capaz de filtrar sustancias químicas tóxicas durante el ciclo de vida del material, a lo que se está expuesto inevitablemente por inhalación o ingestión, configurando un serio problema en la salud [6].

La alta producción de plástico, su derivación como residuo con muy poco o nulo manejo durante su ciclo de vida y las fuertes implicaciones que tienen sobre el ambiente y la salud humana por su alto grado de contaminación, requieren una rápida acción en su dinámica de producción y manejo [7], para lograr su sostenibilidad en el ciclo de vida. Una de las estrategias planteadas para este fin ha sido el reciclaje; sin embargo, el porcentaje de plástico reciclado aún es bajo, corresponde al 16% del total producido y la mayoría de los productos conformados con este material siguen teniendo como destino final algún tipo de vertedero para su incineración o disposición, procesos que se aplican al 65% del total de plástico producido [8].

La *Figura 1* muestra los porcentajes de la producción total de plástico, sus porcentajes como residuos y el tratamiento aplicado sobre ellos en su disposición final. Por lo tanto, el proceso de reciclaje para la recuperación del plástico se hace cada vez más difícil por la calidad del material al llegar como residuo, donde ya han perdido varias de sus propiedades, haciendo que no sea posible reincorporarlos en las cadenas productivas [9]. Así entonces, la búsqueda de una estrategia ambientalmente sostenible y económica viable en el tratamiento y manejo de los plásticos dentro de su ciclo de vida continúa siendo imperativa para la transformación de los procesos de gestión, tratamiento y disposición final; con el fin de reducir el impacto y sus graves efectos socioambientales.

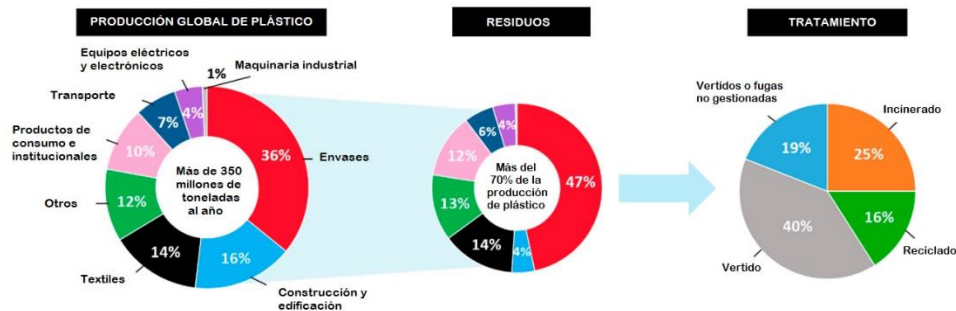


Figura 1. Panorama general de la producción global de plásticos, Adaptada de “Plastic waste recycling and recovery routes” [8]

3. Justificación

La gestión inadecuada de residuos sólidos plásticos ha causado serios problemas ambientales a nivel global; el aumento desmedido de su producción, las bajas tasas de reciclaje y aprovechamiento, los complejos y prolongados procesos de degradación y su mala disposición; son problemáticas socioambientales y tecnológicas que suponen retos significativos en la pertinencia y urgencia de la implementación de acciones y metodologías que permitan una más eficiente gestión y manejo de los plásticos. La agenda hacia el crecimiento económico de los países a partir del desarrollo sostenible [10], involucra alternativas de prevención, tratamiento y aprovechamiento de residuos como un pilar fundamental en la búsqueda de prácticas más sostenibles; incluyendo la transformación de procesos hacia un enfoque de producción más limpia mediante el uso de materiales con menor impacto ambiental a través de todo su ciclo de vida y la disminución de la generación de residuos.

Entre los métodos de gestión de residuos plásticos más divulgados se encuentra el reciclaje, este a su vez se divide en otros en función del tratamiento aplicado como: el reciclaje mecánico, reciclaje de solventes, pirólisis, vertido, incineración, descomposición microbiana, entre otros; siendo el vertido, el reciclaje mecánico y el reciclaje químico (pirólisis) los más practicados [11]. Las tecnologías de eliminación tradicionales, como los vertederos y la incineración, no sólo desperdician una gran cantidad de recursos, sino que también conllevan graves problemas de contaminación secundaria [12], generando, a su vez, problemas de orden ambiental y social. La reducción de los aportes de plástico al medio ambiente requiere priorizarse mediante un enfoque

multidisciplinario global, principalmente a través de la implementación de estrategias para mejorar la sostenibilidad de los plásticos durante todo el ciclo de vida, que incluyen [13]:

1. Producción de plásticos que aborde mejoras a nivel industrial, incluida la utilidad de las evaluaciones del ciclo de vida;
2. Consumo de productos plásticos reduciendo su atractivo para los consumidores, especialmente a través de la educación; y
3. Gestión de residuos abogando por el reciclaje y la recuperación de residuos plásticos.

En la búsqueda de una estrategia efectiva de gestión sostenible y económicamente viable de residuos plásticos, el reciclaje se considera un método esencial. En este sentido, uno de los métodos de reciclaje que ha ganado interés no solo en ámbito académico sino también industrial, es el reciclaje biológico. Este tratamiento de residuos sólidos aprovecha el proceso de compostaje controlado y a los microorganismos existentes en el suelo; los cuales encuentran una fuente de carbono y nutrientes para alimentarse y que subsecuentemente, contribuyen a la degradación de los polímeros a través de una reducción del peso seco, induciendo cambios fisicoquímicos que incluyen alteraciones en la morfología superficial y en la estructura química [14]. El proceso de reciclaje biológico depende esencialmente del tipo de suelo, de allí que se considere especialmente a un país como Colombia que basa su economía principalmente en actividades agrícolas; una de ellas la caficultura, y que además es desarrollada a gran escala en la región centro-occidental del país. En el procesamiento del café; el 90.5% son subproductos considerados residuos que no tienen una buena disposición y manejo, y se han convertido también en agentes contaminantes del suelo y de cuerpos de agua [15]. Dentro de esos residuos del procesamiento, se encuentra la pulpa de café. Esta posee un bajo valor de re-uso y valorización dentro de la cadena de procesamiento en comparación al volumen generado durante el mismo. Sus características microbiológicas pueden aportar al proceso de degradación a través del compostaje, dado que, considerando la pulpa de café como substrato orgánico con un alto valor microbiológico para el crecimiento y propagación de hongos y bacterias bajo las condiciones favorables de humedad, ventilación, pH, puede participar activamente en procesos de degradación, descomposición o desintegración de materiales orgánicos [16].

Por lo tanto, en el presente trabajo se planteó el estudio de la degradación de plásticos tipo PET y PE, de envases de productos alimenticios a través reciclaje biológico utilizando la pulpa de café como principal substrato en el compost, con el fin de configurar una estrategia ambientalmente amigable con potencial de aplicación durante el ciclo de vida de este material que permita reducir el impacto de la contaminación medioambiental del plástico y que sirva como herramienta de tratamiento y manejo a la actual ineficiente gestión, tratamiento y disposición de plásticos, así como también aplicar la pulpa de café para su valorización y reúso de este residuo agrícola propio de la región cafetera.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Explorar la degradación o desintegración de los materiales plásticos utilizados en el envasado alimenticio a través del compostaje utilizando pulpa de café como sustrato

4.2 Objetivos específicos

- 4.2.1** Evaluar el efecto del compostaje utilizando pulpa de café en la degradación de empaques plásticos tipo PET.
- 4.2.2** Evaluar el efecto del compostaje utilizando pulpa de café en la degradación de empaques plásticos tipo PE.
- 4.2.3** Evaluar la evolución de la degradación o desintegración de los empaques plásticos tipo PET y PE a diferentes tiempos de ensayo mediante análisis termogravimétrico (TGA/DTA), microestructural por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), Espectroscopia infrarroja (FTIR) y apariencia visual.

5. Marco teórico

5.1 Definición, tipo y uso común de los plásticos

Los plásticos son conocidos como polímeros, su definición más simple es que son grandes cadenas de moléculas. Cada eslabón de esta cadena está hecho por carbón, hidrogeno, oxígeno y/o silicio que configuran cada uno de los engranajes de esta cadena y que a su vez se unen a través de ganchos, o polimerización, dando forma a la estructura polimérica [17]. Los plásticos pueden dividirse en dos grandes grupos en función de su comportamiento ante el calor: los termoplásticos y los plásticos termoestables. Los primeros se caracterizan por estar compuestos de moléculas lineales con pocos o ningún enlace cruzado, que se reblandecen al calentarse y empiezan a fluir hasta solidificarse al perder calor. Lo segundos consisten inicialmente en moléculas lineales que por calentamiento forman irreversiblemente una red de enlaces cruzados dando un producto final más duro y resistente al calor [18].

Dentro de la categoría de termoplásticos existe una subcategoría denominada cristalinos, haciendo referencia a un tipo de polímero con una estructura ordenada, esto es una proximidad entre las moléculas lo que le confieren una densidad alta, un punto de fusión sensible, alta resistencia química y al desgaste (corrosión, oxidación, entre otros).

A nivel físico la apariencia visual de este plástico muestra una tendencia opaca debido a la proximidad entre las moléculas reduciendo el espacio de transmisión de luz [19]. En esta categoría se encuentran polímeros tales como: El polietileno de alta y baja densidad (PE), polipropileno (PP), poliésteres (PET), ácidos polilácticos (PLA), polímeros de fluoruro (PFA, FEP, PTEE Y ETFE), entre otros [20]. En la *Tabla 1* se resumen algunos de los plásticos de uso común alrededor del mundo, algunas características y propiedades más destacadas.

Tabla 1. Plásticos más comunes con sus usos y aplicaciones [1]

Tipo de plástico	Características y propiedades	Usos y aplicaciones comunes
Polietileno (PE)	Representa más de un tercio de los plásticos que se producen y se venden en el mundo. Son resistentes, flexibles, a prueba de humedad y fáciles de procesar	Utilizados principalmente para envases, envolturas y embalajes

Polietileno de baja densidad (LDPE)	Variedad más flexible	Envolturas y empaques adherentes, botellas flexibles, vasos para bebidas frías y calientes
Polietileno de alta densidad (HDPE)	Variedad más resistente	Bolsas para supermercado. Algunas variedades más rígidas son empleadas en la producción de botellas para detergentes, botellas de leche y bolsas para cereales
Polipropileno	Puede soportar temperaturas más altas que el polietileno, elevado punto de fusión y no requiere manipulación cuidadosa. Soporta la tensión y el uso constante	Tapas para botellas, accesorios para automóviles, pañales desechables, camisetas térmicas y trajes para astronautas
Vinilo (PVC)	Representa uno de los plásticos con más versatilidad y puede presentarse en forma rígida, flexible, correosa. Se mezcla fácilmente con otros productos químicos	Recubrimiento de paredes y pisos, aislante de cables eléctricos, tuberías, instrumentos y equipos médicos
Poliestireno	Puede adoptar forma de espuma expandida pero también ser fuerte y duro. Tiene una versión de alto impacto	Empleado en vasos de café, piezas de (EPS) para protección de envíos frágiles. Estuches de CD, máquinas de afeitar desechables y cubiertos. Frascos, probetas y cajas de Petri
Poliuretano	Viene en forma de espuma. Puede ser blando y flexible, o resistente y rígido. Es bastante elástico y puede llegar a convertirse en fibra	Relleno para muebles, zapatillas deportivas, revestimientos aislantes de edificios y refrigeradores. También se emplea para la fabricación de lycras y condones
Tereftalato de polietileno (PET)	Destacado en la familia del poliéster. Puede ser transparente y tiene la gran capacidad de impedir la entrada de oxígeno	Fibras antiarrugas y textiles. Envases de alimentos y toda la línea de botellas para bebidas
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)	Material duro, brillante y amortiguador	Piezas de lego, instrumentos musicales (flautas, clarinetes), carcasas para teléfonos, utensilios de cocina y piezas de carrocería de automóviles
Fenoplásticos	Uno de los primeros plásticos sintéticos elaborados. No puede fundirse y volverse a moldear. Son de características fuertes, duras y presentan una amplia capacidad para aislar la capacidad	Instalaciones eléctricas, artículos de fórmica y mangos para cubiertos. Piezas de ajedrez y fichas de damas y dominó
Policarbonato	Resistente, duradero y elástico. Elaborado como producto de conseguir una seda artificial	Empleado en tejidos, cuerdas para instrumentos, moquetas, velcro y cuerda. Tornillos para maquinaria, engranajes, hélices de barco, peines y cerdas de cepillo
Acrílico	Transparente como el cristal, pero con una resistencia infinitamente mayor. Puede soportar condiciones extremas del clima y servir como elemento de seguridad para detener balas	Vehículos blindados, ventanillas de aviones, señales exteriores y luces de vehículos

5.2 Variedad PE y PET como polímeros más usados en la industria alimenticia

La mayoría de los polímeros están formados a partir de productos de la refinación del petróleo, estimándose que alrededor de un 3% del petróleo crudo se destina a este tipo de productos petroquímicos [21]. En Colombia se consume alrededor de 1.250.000 toneladas de plástico al año, del cual el 56% corresponde a plásticos de un solo uso (empaques para alimentos, envases, cubiertos desechables, platos desechables, pitillos entre otros), por lo que se estima que cada colombiano consume aproximadamente 24 kilos de plástico anualmente, es decir, 2 kilos de plástico al mes, lo que significaría a su vez 60 gramos por día [22]. Los polímeros tipo PET y PE son esencialmente los más utilizados en la fabricación de empaques alimenticios representando los plásticos de un solo uso.

5.3 Tereftalato de Polietileno (PET)

El plástico PET se emplea en la fabricación de envases ligeros, transparentes y resistentes desde 1976, y hasta en la actualidad se han tecnificado los procesos de producción hasta obtener materiales mucho más ligeros y con una alta resistencia. En la *Figura 2* se representa cómo la fabricación del PET se hace a partir del ácido teraftálico (TPA) y etilenglicol (EG) en un proceso de polimerización. Una vez combinados los elementos principales, la resina de PET se funde para crear una figura similar a la de un tubo de ensayo por moldeado de inyección y finalmente alcanzar el material polimérico con la capacidad de tomar cualquier forma o grosor mediante procesos de soplado. Este polímero presenta un alto grado de cristalinidad y termoplasticidad en su comportamiento, lo que permite que sea uno de los más usados en la industria para la obtención de envases plásticos para bebidas (rígido y resistente) y alimentos (ligero y resistente) [23]. En la *Figura 3* se puede observar el diagrama de flujo para la obtención del PET como envase para la industria alimenticia.

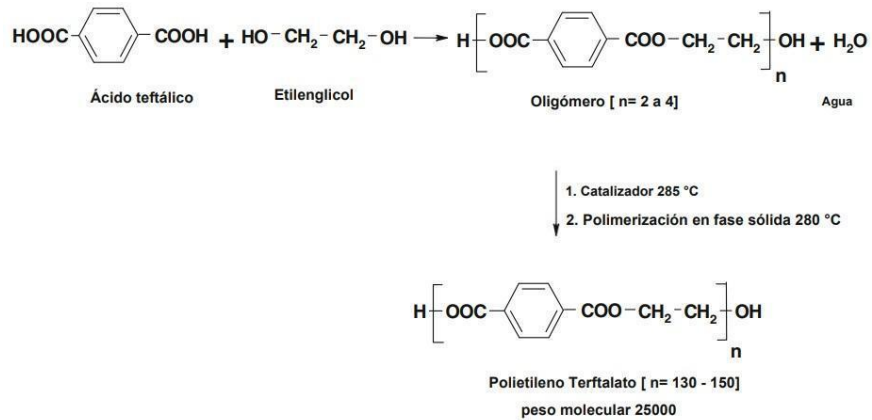


Figura 2. Obtención del PET [23].

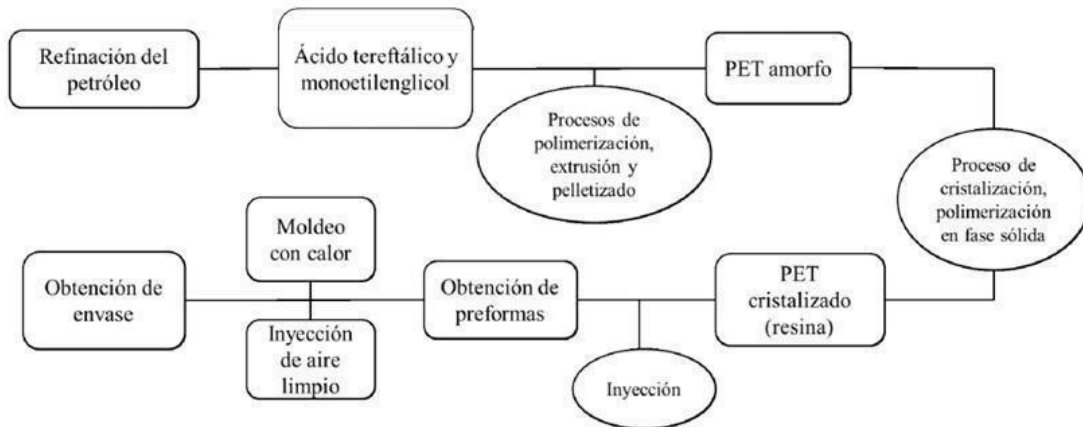


Figura 3. Proceso obtención del PET en forma de envase [24] [25].

5.4 Tereftalato de Polietileno (PET)

El polietileno (PE) es el polímero más simple desde el punto de vista químico, aunque existen una gran variedad de tipos y procesos de fabricación. El polietileno es un polímero termoplástico de grandes cadenas lineales no ramificadas con alta resistencia química ante agentes oxidantes y reductores [26]. Este polímero se puede obtener desde diferentes procesos de polimerización; polimerización del etileno, polimerización por radicales libres, polimerización aniónica, polimerización por coordinación de iones o polimerización catiónica. Cada una de estas vías representa un tipo diferente de polietileno que se manifiesta en la particularidad de su densidad confiriendo características definidas a cada tipo de plástico. En el mercado actual los plásticos tipo

PE más comunes se subdividen en función de su densidad obteniendo así: polietileno de baja densidad como un material con cadenas ramificadas lo que indican que las moléculas no se compactan de manera estricta y el plástico obtenido es de características de menor resistencia a la tracción, pero con aumento de la ductilidad. Está también el polietileno de alta densidad con poca ramificación otorgándole características con alta rigidez, dureza y resistencia [27][28]. En la *Figura 4* se ilustra el proceso de obtención del plástico PE a partir de la polimerización por adición cuando la molécula de monómero pasa a formar parte del polímero sin pérdida de átomos, es decir, la composición química de la cadena resultante es igual a la suma de las composiciones químicas de los monómeros que la conforman.

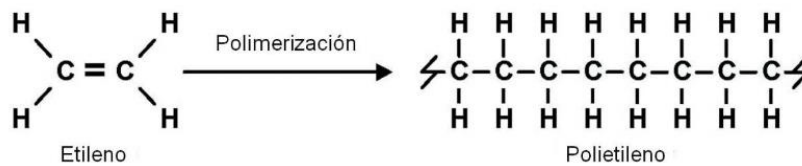


Figura 4. Proceso obtención del PE en forma de envase [27][28].

5.5 Alternativa de gestión de residuos plásticos

La transición de un objeto útil a un producto de desecho representa un punto de quiebre que aún sigue siendo de interés y que representa una definición subjetiva a las necesidades de los seres humanos. En este aspecto existen tendencias que estudian estas transiciones a través del *análisis del ciclo de vida* (ACV), en donde se identifica, cuantifica y caracteriza los diferentes impactos ambientales potenciales, asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto [29].

La prevención, como herramienta para reducir las altas tasas de generación de residuos plásticos, se encuentra con fuertes condicionantes relacionados con el comportamiento individual de las personas; limitando así la correcta gestión con el auge de la sociedad de consumo que, históricamente, ha modificado los materiales utilizados para contener y comercializar productos alimenticios según las necesidades específicas poblacionales. Las propiedades fisicoquímicas de los plásticos, que se componen por un amplio espectro de polímeros de alto peso molecular derivados de compuestos sintéticos, semisintéticos o naturales; ensamblados en forma repetitiva les confieren una sencilla fabricación, transporte, versatilidad y amplia gama de aplicaciones a un coste inferior a alternativas tradicionales (metal, vidrio, cerámica). La relación de coste/beneficio

del plástico con respecto a otros materiales alternativos han dificultado su reemplazo o transformación en los mercados internacionales [30].

El tratamiento, manejo y disposición de los residuos plásticos constituyen aspectos fundamentales hacia la denominada economía circular, pero al ser sin duda un residuo heterogéneo, el potencial de aprovechamiento se limita, además que sus propiedades y características que le hacen destacarse, también ocasiona que existan para ellos procesos degradativos más complejos [31]. En la *Tabla 2* se describen algunos de los tipos de degradación aplicada los plásticos

<i>Tabla 2. Tipos de degradación en plásticos [32].</i>	
Degradación térmica	Las propiedades varían con la temperatura (debilita las fuerzas cohesivas entre las moléculas) genera ablandamiento del material y afecta propiedades físicas, ópticas, mecánicas y eléctricas El punto de fusión depende del peso molecular (directamente proporcionales)
Degradación mecánica	Efectos macroscópicos por fractura y deformación por influjo de fuerzas. Existen algunos test o pruebas que se permiten hacer esta degradación, describirla
Degradación química	Desintegración de la estructura (moléculas de cadena larga) inducidos por el influjo de reactivos químicos (ácidos, bases, solventes, gases reactivos) que entren en contacto con los polímeros
Biodegradación	Solo sucede en condiciones ambientales apropiadas La presencia de biocidas los puede hacer biorresistentes

5.6 Alternativa de gestión de residuos plásticos

5.6.1 Enfoque de ciclo de vida

El análisis del ciclo de vida (ACV) es un método diseñado para evaluar los impactos de un producto o proceso en el medio ambiente. Cuando se aplica correctamente, el análisis del ciclo de vida permite estimar los posibles impactos ya sean positivos o negativos de un producto, algunos de los cuales normalmente serían invisibles. Al considerar los materiales, procesos y subproductos anteriores que son necesarios o inevitables en la fabricación de un producto, se puede evaluar el impacto de su elección y de sus procesos. El análisis de ciclo de vida también puede medir los impactos posteriores del producto, en su uso y al final de la vida útil en el medio ambiente [33].

El excesivo uso de plásticos, especialmente bolsas y botellas, proyectan la cercana relación que el hombre tiene con estos materiales, y especialmente una actitud marcada por la cultura del

desecho desde la que se ha creado una nueva categoría de clasificación de plásticos:” Plásticos de un solo uso” [27]. El consumo, manejo y disposición de estos productos plásticos evidencian limitaciones y problemas en todas las etapas del ciclo de vida de los plásticos. Las políticas a nivel mundial, regional y local se centran en mirar este problema únicamente en la última parte del ciclo de vida enfocada en el manejo de residuos descuidando etapas cruciales como la producción y el consumo [34]. Mientras se replantean las dinámicas de producción y consumo, los intereses científicos han hecho hincapié en encontrar nuevos y más eficientes estrategias de extender la vida útil de plásticos hasta encontrar alternativas ambientalmente sostenibles para disponer los residuos. En la *Figura 5* se presenta un diagrama de flujo que ejemplifica la producción de los tipos de plásticos, algunas rutas de recuperación y las formas de reciclaje utilizados en la actualidad.

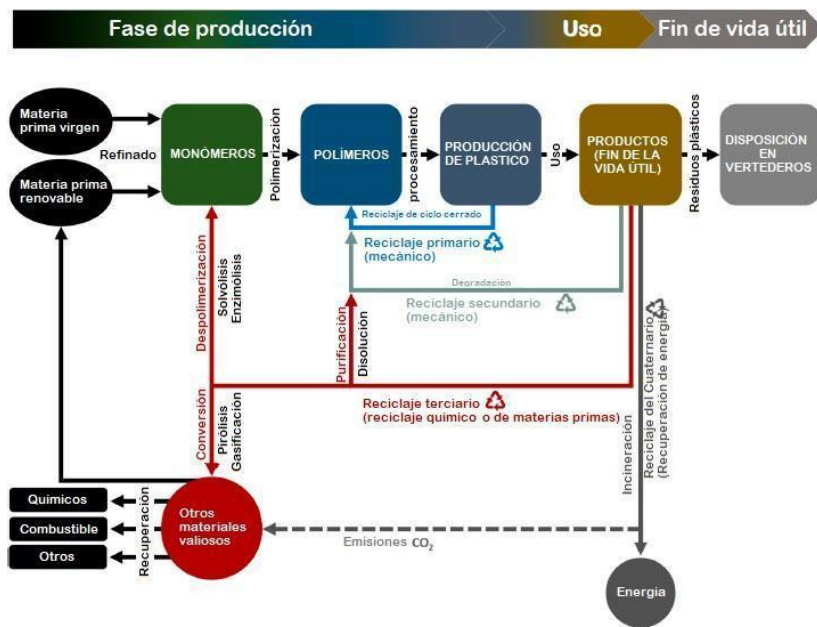


Figura 5. Rutas de reciclaje y recuperación de residuos plásticos [8]

5.6.2 Recuperación energética

El reciclaje de materiales plásticos ha tenido un comienzo lento comparado con otros materiales como el vidrio, el papel y cartón. Incluso la mayoría de los países en Europa que tienen sólidos sistemas de aprovechamiento han tenido un desarrollo lento con este producto residual. El principal problema asociado a este lento aprovechamiento se debe especialmente a sus características, que lo hacen un material versátil y extremadamente útil, pero los aditivos y

compuestos adicionales ocasionan que su reciclaje sea un tratamiento complejo y lento. El 14% de los plásticos se quema para recuperar energía en un proceso donde el plástico difícil de reciclar es quemado a través de combustión para generar energía eléctrica y calefacción. Sin embargo, este proceso genera problemas asociados a la contaminación atmosférica. El otro 14% es reciclado con un 8% de “reciclado de cascada” obteniendo una calidad desmejorada del plástico con una calidad inferior de materia, y solo el 2% es posible utilizarlo en el reciclaje de circuito cerrado donde puede utilizarse como materia prima virgen [35]. Los porcentajes de reciclaje de material plástico aún están muy por debajo de lo que se espera. A pesar de esto, las tecnologías siguen avanzando y se han logrado desarrollar diferentes tipos de alternativas como: extrusión reactiva, deslaminación multicapa, extrusión con fluidos supercríticos, entre otras para enfrentar esta problemática mundial.

5.6.3 Recuperación energética

El primer paso hacia una adecuada gestión de residuos se sitúa en el origen; es decir, la utilización de menores cantidades de plásticos para cubrir las prestaciones de un producto, al mismo tiempo que se rediseña este mismo reduciendo el consumo de material para fabricarlo. Por otro lado, la reutilización ha sido entendida como un intento por extender la vida útil de los productos plásticos o el cierre adecuado de su utilidad, pero su implementación se ha visto interrumpida por la complejidad que presentan algunos tipos de plásticos al perder propiedades durante su uso y consumo. Finalmente, cuando los primeros dos intentos, estos son: la utilización de menores cantidades y la reutilización no han sido suficientes, el reciclaje resulta ser la única y mejor opción entendido este como proceso mediante el cual los residuos se convierten en nuevos productos o en recursos materiales que sirven de materia prima para fabricar otros productos.

5.6.4 Reciclaje mecánico

El método más común para el reciclaje de desechos plásticos es el reciclaje mecánico. Este proceso normalmente incluye la recolección, clasificación, lavado y trituración del material. Por muchos años ha sido la vía más utilizada para recuperar plásticos, pero cuando el material residual se encuentra en contacto o contaminado con otras sustancias, esta alternativa resulta poco eficiente. El reciclaje mecánico es eficiente cuando el material residual es de tamaño grande y se presenta

en abundantes cantidades clasificado por tipo (color, forma, o tamaño). Una vez clasificado el material pasa a trituración y molienda, luego a procesos de lavado hasta separar la suciedad del plástico. Finalmente se centrifuga y se seca para extruirlo hasta obtener pellets listos para ser procesadas [36]. En la *Figura 6* se representa un diagrama de flujo del proceso de reciclaje mecánico señalando componentes, subprocesos y rutas de procesamiento.

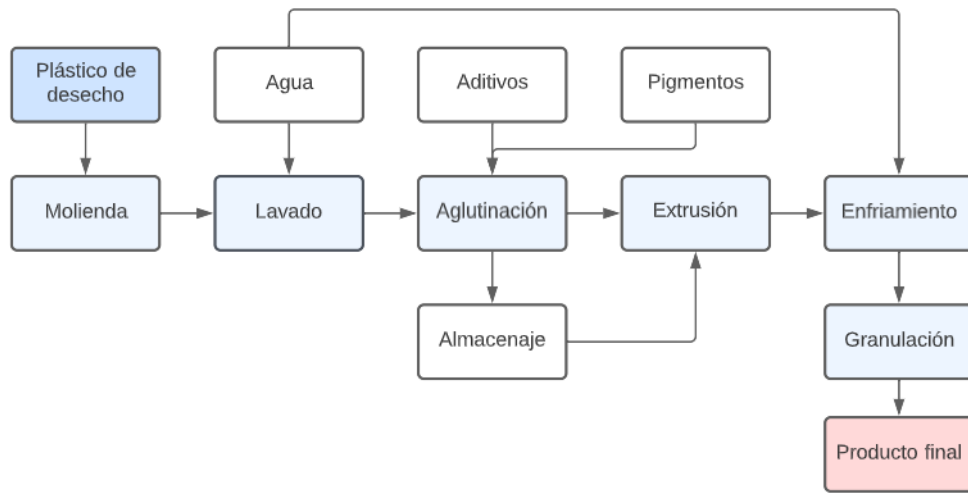


Figura 6. Etapas de reciclaje mecánico [37]

5.6.5 Reciclaje químico

Otra de las alternativas utilizadas es el reciclaje químico o ternario. Este tipo de reciclaje es referido como una tecnología avanzada en donde el material plástico se convierte a moléculas más pequeñas, usualmente líquidos o gases, que son posteriormente usados como materia prima en nuevos procesos petroquímicos y plásticos [37]. El principio químico detrás de esta técnica es la despolimerización en presencia de catalizadores para producir grandes cantidades de producto con poco residuo. Los estudios han demostrado que para plásticos tipo PET y PE este método es útil dada la naturaleza de sus estructuras poliméricas y las ramificaciones [38].

5.6.6 Reciclaje térmico

Otra alternativa utilizada es el reciclaje térmico como una alternativa diferente y altamente eficiente respecto a las estrategias de reciclaje ya descritas. Esta técnica busca reducir la estructura orgánica del polímero hasta romper los enlaces de las cadenas obteniendo productos de refinería

como petróleo crudo y gas. Muchas industrias han escogido este tipo de reciclaje principalmente porque permite tratar plásticos heterogéneos y contaminados que no han tenido tratamientos previos. El craqueo térmico o pirólisis es la técnica más común dentro esta categoría de reciclaje dado que la degradación del material plástico se efectúa por calentamiento en la ausencia de oxígeno, en un rango de temperatura entre 500 a 800°C con la formación resultante de carbón y una fracción volátil que puede separarse en aceite y un gas no condensable de alto valor calorífico [39].

5.6.7 Reciclaje biológico

Mucho más reciente que las anteriores, son los enfoques mediados biológicamente. La capacidad de algunos microorganismos para acelerar la degradación del plástico intrínsecamente degradable ha despertado el interés de muchos académicos y científicos. La gran diversidad de microorganismos que existen en el suelo, el compost, ambientes marinos, con el tiempo y la exposición, tienen la capacidad para degradar el plástico a través de rutas metabólicas para asimilarlo en forma de energía [40]. Los más recientes estudios han encontrado que los microorganismos producen y secretan enzimas degradantes que pueden actuar de manera directa sobre la estructura polimérica del plástico aun cuando las condiciones ambientales son poco favorables [41].

En general, el proceso de biodegradación consta de las siguientes etapas: (I) adherencia del microorganismo a la superficie plástica, (II) crecimiento del microorganismo y colonización, incluida la formación de biopelícula al metabolizar el polímero como fuente de carbono, (III) la escisión del polímero a través de la hidrólisis enzimática en moléculas de cadena más corta, y (IV) la degradación final en oligómeros y dímeros de bajo peso molecular y sus subproductos, incluidos CO₂, agua o metano [42]. El éxito de esta técnica dependerá en gran parte de la facilidad que tengan los microorganismos para ingresar a la estructura del polímero, actividad que resulta ser el mayor problema de esta técnica principalmente por las propiedades de resistencia de los plásticos y los aditivos que lo componen.

5.7 Alternativa de gestión de residuos plásticos

Aunque los polímeros sintéticos alguna vez se consideraron resistentes a degradación microbiana, estudios más recientes han demostrado que ciertos microbios tienen capacidad de producir una variedad de enzimas hidrolíticas que les permiten degradar y procesar polímeros. La biodegradación de polímeros que involucran microorganismos puede ser realizada por una comunidad microbiana o una sola cepa a través de varios pasos [8], como puede evidenciarse en la *Figura 7*.

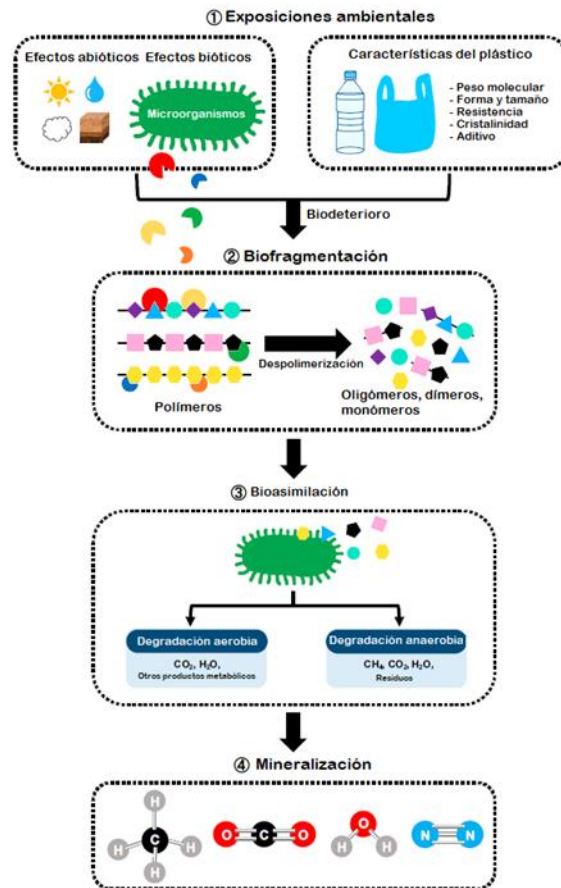


Figura 7. Mecanismo de degradación microbiana de los plásticos, adaptada de "Plastic waste recycling and recovery routes" [8].

Primero, la macroestructura de la matriz plástica se fragmenta en pequeños pedazos debido a cambios abióticos y bióticos, es decir, luz solar, irradiación, oxígeno, pH, humedad, temperatura, presión y abrasión actúan sobre el plástico. Los microorganismos son capaces de utilizar los plásticos como fuente de carbono y energía adhiriéndose a los polímeros. Seguido de la

colonización de la superficie y la formación de biopelículas, el biodeterioro por las comunidades de biopelículas que crecen en la superficie y en el interior de los plásticos amplía el tamaño de los poros y facilita las grietas.

Esta biofragmentación se relaciona con la acción de las enzimas extracelulares que degradan los polímeros (es decir, oxigenasas, ureasas, esterases, lipasas, proteasas, despolimerasas, cutinasas, etc.) segregadas por las colonias microbianas. Estas enzimas permiten reducir el peso molecular y acortar el esqueleto de la cadena de carbono de los polímeros mediante la despolimerización total o parcial en oligómeros, dímeros y luego monómeros que pueden ser asimilados por las células. Seguido a la biofragmentación se encuentra la bioasimilación, refiriéndose a la integración de los átomos en el interior de las células. Los microorganismos pueden metabolizar fácilmente la mayoría de las moléculas pequeñas (oligómeros de menos de 600 Daltons) y convertir el carbono/nitrógeno del polímero en bloques de construcción de las células lo que contribuye a aumentar la biomasa. Con el proceso de bioasimilación culminado, el último paso de la biodegradación del polímero es la mineralización, que es la excreción de metabolitos oxidados completos, como CO_2 , CH_4 , N_2 y H_2O [8].

Diferentes estudios han analizado la degradabilidad del plástico tipo PET y PE a través del compostaje, encontrando que los plásticos contienen una compleja mezcla de estabilizadores que evitan que se degraden demasiado rápido, pues muchas de las propiedades más ventajosas de los plásticos, como su inercia química, física y biológica y su durabilidad, plantean problemas cuando el plástico se libera en el medio ambiente. Plásticos comunes como el polietileno (PE), y el tereftalato de polietileno (PET) son extremadamente persistentes en el medio ambiente, donde sufren una fragmentación muy lenta [43]. Los microorganismos, tanto hongos como bacterias, tienen el potencial de crecer en polímeros. Hay pocos informes sobre la biodegradación del PET, la mayoría de los cuales están relacionados, entre otras cosas, con la degradación enzimática del plástico, incluyendo la despolimerización a través de la hidrólisis, la alcoholólisis, la glucólisis, la amonólisis. Estos informes suelen emplear enzimas aisladas de microorganismos, también se ha utilizado la hidrolasa de poliéster de *Thermobifida* para hidrolizar el PET [44]. Por otro lado, se encuentra que antes de la prueba de biodegradabilidad, a través del análisis SEM, la superficie del PE presentaba una matriz continua uniforme y lisa. Después de 90 días en las condiciones de

compostaje, la superficie del el PE permaneció sin cambios, lo que indica que no fue atacado por los microorganismos en condiciones de compostaje [45].

5.8 Substrato de pulpa de café

La pulpa del café posee características apropiadas para el proceso de compostaje ya que contiene un alto contenido de azúcares (fuente energética), una buena relación carbono/nitrógeno (2:1) y un tamaño de partícula adecuado, por lo que el compostaje se ha difundido como una alternativa de manejo de este desecho. El uso de la pulpa de café estimula la vida micro y meso biológica [46]. Colombia es el segundo productor mundial de café, siendo éste el cultivo nacional más relevante en el sector agrícola. El desarrollo industrial de esta actividad ha llevado consecuentemente al incremento en la generación de residuos, los cuales se han convertido en una problemática tanto ambiental como económica.

Como se representa en la *Figura 8*, en la producción de café como bebida, solo el 9,5% del peso del fruto es utilizado para su elaboración, quedando un 90,5% de residuos entre los que se destacan las hojas, ramas y tallos que se generan durante la renovación de los cafetales, frutos no adecuados para la producción de café. Los residuos como la pulpa del fruto representan un 44% del peso del fruto seco y la borra, que es el producto de la preparación de café a partir del café tostado y molido, representa el 10% del peso del fruto seco. Se estima que para una producción de 942.327 t/ año de café, se producen 2.008.192 t/año de residuos de pulpa los cuales no son aprovechados en su totalidad [47].

Los residuos como producto de la actividad cafetera son generalmente dispuestos en terrenos o fosas para su descomposición, sin controlar su lixiviación afectando directamente los suelos y fuentes de agua. Por otro lado, son aprovechados como fertilizantes gracias a los beneficios de sus propiedades fisicoquímicas en la recuperación y enriquecimiento de suelos. Otra de las técnicas empleadas gracias a su sencillas y eficiencia, es el lombricompost, acelerando la transformación de residuo a un producto aprovechable. Dentro de los usos menos comunes se encuentra que se utiliza para la alimentación de animales [48].

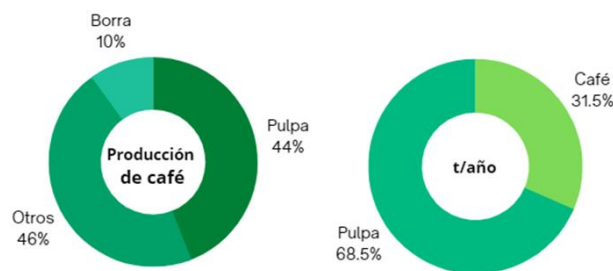


Figura 8. Productos en la elaboración de café como bebida. Elaboración propia.

La pulpa constituye el residuo más abundante del proceso. Cuando no se utiliza adecuadamente genera la mayor fuente de contaminación ambiental en las zonas de disposición debido a su alto contenido de material orgánico. Los sistemas de tratamiento utilizados actualmente resultan insuficientes y en muchos casos inapropiados para este tipo de residuo, por lo que se hace necesario la búsqueda de otros sistemas más integrales y eficientes [49], que aprovechen las bondades fisicoquímicas de la composición de la pulpa. La caracterización microbiológica de este residuo después de uso en procesos de compostaje reveló microorganismos como: *Actinomadura*, *Aspergillus*, *bacilos gram(+)*, *Cladosporium*, *Enterobacter*, *Escherichia*, *Streptomyces*, *Flavobacterium*, *Xanthomona*, *Geotrichum*, *Penicillium*, *Achromobacter*, *Staphylococcus*, *Proteus*, *Rhodotorula*, *Serratia*, *Vibrio* y *Yersinia* [16]. Determinar los microorganismos presentes en la pulpa de café utilizada, a través de la caracterización microbiológica, permitirá establecer su posible efecto sobre los procesos degradativos del plástico objeto de estudio. Además, permite generar líneas base integrando el efecto de las riquezas microbiológicas sobre las propiedades biológicas, físicas y químicas de los componentes utilizados para este tipo de estudios.

5.9 Técnicas de caracterización

5.9.1 Espectroscopia de Infrarrojo (FT-IR)

La técnica de FTIR ha sido la más empleada en estudio de polímeros. Los análisis con esta técnica brindan a los investigadores una capacidad considerable para distinguir e identificar polímeros [50]. Se basa en el registro simultaneo de todas las frecuencias del espectro IR en las que la obtención de la radiación se hace a través de la muestra y por uso de un interferograma que funciona como separador haciendo que el haz luminoso incida sobre un espejo fijo y la otra mitad sobre un espejo móvil cuyas distancias pueden variarse. Como la radiación IR es policromática

(función de varios colores), el interferograma obtenido es una superposición o suma de interferogramas de todas las frecuencias individuales. Un espectro de infrarrojo se divide en dos regiones, la primera, entre 4000 y 1500 cm^{-1} conocida como la región de huella digital en la que las bandas provienen de vibraciones de enlaces presentes en las moléculas consideradas como grupos funcionales [51]. Entre 1500 y 500 cm^{-1} , las bandas que allí aparecen corresponden a vibraciones de los enlaces presentes en la estructura molecular. El éxito de esta técnica está en permitir la identificación de los grupos funcionales de compuestos químicos presentes en una muestra o material de estudio por efecto de las vibraciones específicas como, por ejemplo, los estiramientos de OH y CH que aparecen alrededor de 3200 cm^{-1} y 2900 cm^{-1} , respectivamente [52][53]. El uso de esta caracterización en muestras poliméricas que han sido sometidas a condiciones de degradabilidad permitirá no sólo identificar el tipo de polímero por sus grupos funcionales, sino que además proyecta información acerca de cambios a nivel químico asociados a la aparición o desaparición de una o más bandas espectrales evidenciando dinámicas de degradación.

5.9.2 Termogravimetría (TGA)

El análisis térmico consiste en la medida de los cambios físicos o químicos que tienen lugar en un material en función de la temperatura a través del calentamiento o enfriamiento con un programa de temperatura controlada. Si la propiedad que se registra es la variación de la masa de la muestra con la temperatura, el análisis se denomina termogravimétrico [54].

El análisis termogravimétrico consiste en registrar continuamente la variación de la masa del material conforme se varía la temperatura a una tasa térmica constante (análisis dinámico). Existe otro tipo de análisis en el que se registra la misma variación de la masa mientras la temperatura se mantiene constante en un periodo de tiempo establecido (análisis de control). El resultado final de esta técnica cuando es aplicada sobre muestras poliméricas es obtener los datos de cambio de masa frente a la temperatura o el tiempo lo que se representa gráficamente como una variación porcentual en peso [55].

Un equipo convencional para análisis de TGA es principalmente una termobalanza que consta de 5 partes principales: 1. Una microbalanza electrónica y su equipo de control 2. Un horno y los sensores de temperatura, habitualmente un termopar colocado en las proximidades de la muestra,

pero no en contacto con ella. 3. Un programador de temperatura. 4. Un controlador de la atmósfera (tipo de gas y caudal). 5. Dispositivo para almacenar los datos de peso y temperatura fundamentalmente [56].

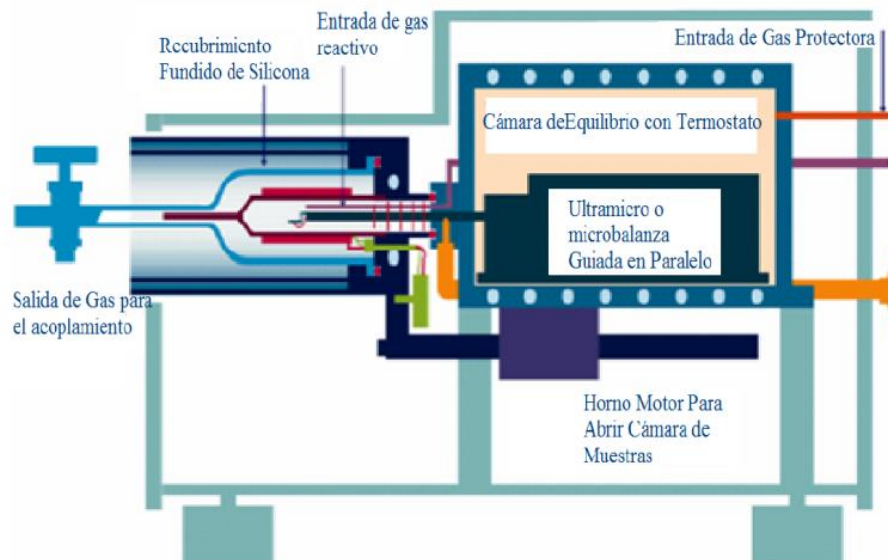


Figura 9. Esquema de TGA [56].

Es de particular cuidado en un estudio de TGA, considerar las variables que se estudian porque las condiciones experimentales afectan las curvas del TGA por esto se recomienda siempre monitorear los factores instrumentales (tamaño del horno, tipo de gas y velocidad de flujo) y las características de la muestra (tamaño, densidad, cantidad y grado de cristalinidad [56].

Los resultados que se obtengan en un análisis de este tipo es preciso compararlos con estudios previos que brinden información que permitan identificar qué reacciones químicas se producen a ciertas temperaturas y qué se proyectan en las particularidades formas de las curvas de TGA.

5.9.3 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

Esta técnica de caracterización permite examinar los cambios en la morfología de los materiales escala nanométrica [57]. La imagen se forma de manera digital a través de un computador que interpreta la cantidad de electrones detectados y a cada zona le asigna una intensidad de color en la escala de grises de acuerdo con una convención general: Las zonas de donde se detecten mayor

número de electrones se representarán con un color más blanco. Por ello, las imágenes construidas tienen la apariencia de una fotografía en escala de grises, aunque algunas veces se añade un color en escala de saturación creciente para resaltar ciertos aspectos morfológicos o para resaltar cambios en la superficie de la muestra como ocurre con la mayoría de las películas poliméricas analizadas. Dada la alta resolución que se puede lograr en SEM, es posible conocer las características más detalladas de un material: su estructura cristalina, porosidad, morfología superficial y hasta su composición química [58].

La técnica permite observar la rugosidad de la superficie como resultado de la deformación plástica [59], el seguimiento puede establecerse a través del análisis cualitativo, evidenciando cambios significativos en la superficie a través del tiempo, como lo es la erosión y grietas como evidencia de la actividad microbiana, además se pueden presenciar cambios a través de la pérdida de la naturaleza filmica. La reducción de las propiedades mecánicas es una de las principales consecuencias del proceso de degradación que ocurre durante el compostaje, este proceso también favorece la acción de los microorganismos. Este efecto podría explicarse porque a través de la pérdida de propiedades mecánicas después del tratamiento de compostaje se produce un material frágil compuesto por trozos rotos con alta densidad de defectos, como grietas y estructura porosa, permitiendo el fácil acceso de los microorganismos a la masa del polímero [60].

5.9.4 Análisis Microbiológico de secuenciación profunda (NGS)

Este análisis es una herramienta de estudio de la diversidad de comunidades microbiológicas. Secuenciando las partes del DNA ribosomal (16S rDNA or ITS) de muestras ambientales, esta técnica puede generar grandes cantidades de datos que permitirán un rápido y profundo análisis de las comunidades microbianas. Sin embargo, el proceso y evaluación de las secuencias de NGS es un gran reto debido a la gran cantidad de datos generados [61]. Hay dos conceptos que son fundamentales para entender el proceso y los resultados de las pruebas basadas en tecnologías NGS: cobertura y profundidad [62]. Este análisis se realiza con el fin de identificar los microorganismos existentes en la pulpa de café empleada para el estudio. Los análisis microbiológicos aportan información importante para entender las dinámicas de degradación naturales en el substrato utilizado, en tanto que indica con especificidad los grupos de microorganismos que colonizan según un análisis de clasificación y abundancia para las muestras

de compostaje de café de categoría taxonómica su filo, familia y género. Estudios recientes sobre los suelos cafetaleros brindan disponibilidad de carbono orgánico e hidrosoluble, creando un escenario ideal para la sustentabilidad de una gran diversidad microbiana [63].

6. Metodología experimental

Haciendo uso de la Norma ISO 2022:2015 como herramienta metodológica que determina el grado de desintegración de los materiales de ensayo de laboratorio en condiciones que simulan un proceso de compostaje aeróbico intensivo; se planteó el siguiente diseño experimental:

6.1 Material de ensayo

Las muestras consideradas tipo PET (botellas) y PE (bolsas) para el estudio, se tomaron aleatoriamente de los depósitos de basura dentro del campus de la Universidad Católica de Manizales (UCM). Las botellas y bolsas fueron recortadas para obtener fragmentos de dimensiones definidas de 3x3cm y 9x9cm; con peso en gramos de $0,3830 \pm 5 \times 10^{-3}$ y $0,4220 \pm 5 \times 10^{-3}$ respectivamente, asegurando de 5 a 20g de material de ensayo. En total 18 muestras fueron ubicadas en cada uno de los reactores debidamente marcados para su identificación en el tiempo de tratamiento.

6.2 Diseño experimental

Se dispusieron 4 reactores (*R1, R2, R3, R4*) para cada tipo de plástico PE y PET, es decir en total se tuvieron 8 reactores. El tipo de plástico se tomó como un factor de interés con 2 niveles: PE y PET. En cada reactor se introdujeron 18 fragmentos de plástico a los cuales se les realizó seguimiento sobre la variación de su peso a medida que transcurría el tiempo, estos fragmentos son nombrados como Muestras (*D*) (*D0, D10, ..., D80, D90*). Las mediciones en el tiempo se realizaron cada 5 días, desde que se introdujeron inicialmente en el reactor (tiempo cero, *D0*) hasta haber cumplido con un tiempo de seguimiento de 90 días (*D90*), tal como puede verse en la *Tabla 3*.

Diseño del tratamiento: para explorar la variación en el peso de las muestras de plástico, se guardó extremo cuidado para que el peso de las muestras solo variará en la última cifra significativa en la balanza analítica (± 0.0001). Se tuvieron 2 tratamientos que podían influir en la manera de la degradación realizada por parte de bacterias, esto asociado específicamente con los tipos de plástico utilizados: 1. PE y 2. PET.

Diseño del experimento: se tenían 8 reactores los cuales se asignaron al azar a los 2 tratamientos en un diseño completamente aleatorizado. La toma de los pesos en una balanza analítica con precisión de $10^{-4}g$, fue el medio con el que se supervisó la variación de los pesos en las muestras de plástico a medida que transcurría el tiempo. La diferencia entre la masa final respecto a la inicial (luego del tratamiento en compostaje) se usó como la variable de respuesta.

Mediciones repetidas: durante el estudio se observaron las variaciones del peso de cada muestra de plástico en cada reactor cada 5 días, a los tiempos en días 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85 y 90. En la siguiente tabla se muestra la manera en que se dispuso el experimento:

Tabla 3. Disposición del experimento

<i>Tratamiento</i>	<i>Reactor</i>	<i>Tiempo de observación (días)</i>				
		<i>5</i>	<i>10</i>	<i>15</i>	<i>...</i>	<i>90</i>
PE	1	Respuestas del cambio en el peso de las muestras de plástico				
	2					
	3					
	4					
PET	5	Respuestas del cambio en el peso de las muestras de plástico				
	6					
	7					
	8					

6.3 Preparación del compost

La pulpa de café que se empleó como substrato del compost se obtuvo en forma de residuo de la actividad agrícola procedente de la región del departamento de Caldas. Posterior a esto, se sometió a secado a temperatura ambiente durante 5 días. Subsecuentemente, la pulpa de café se

dispuso en un horno de recirculación a 60°C durante 13 horas, con el fin de reducir la humedad presente en la pulpa.

Cada uno de los materiales y porcentajes utilizados en la preparación del compost son presentados en la *Tabla 4*. Previo a su mezclado, los materiales fueron triturados y tamizados con una malla de abertura comprendida entre 0,5 cm y 1 cm. La mezcla fue hecha manualmente hasta obtener una apariencia visualmente homogénea. La mezcla no se comprimió, permitiendo de esta manera un intercambio eficaz de gases con el interior del lecho. La pérdida de humedad por temperatura se ajustó cada 5 días agregando agua a los sistemas

Tabla 4. Composición del compost

<i>Materiales</i>	<i>% Masa seca</i>	<i>Masa (kg)</i>
Aserrín	20	2,4
Pulpa de café	30	3,6
Tierra fértil (compost maduro)	35	4,2
Hojas secas	7	0,84
Hojas verdes	7	0,84
Úrea	1	0,12

6.4 Puesta en marcha

Cada reactor se cierra, se pesa y se introduce en una estufa con circulación de aire manteniendo una temperatura constante de (55 ± 2) °C durante un período de 90 días. Se registra la temperatura de los reactores cada 2,5 días. Las últimas especificaciones se aseguran con el fin de mantener las condiciones medioambientales adecuadas y garantizar un buen compostaje.

El procedimiento descrito permite airear la materia de compostaje mientras se mantiene un contenido suficiente de agua. Al comienzo del proceso de compostaje se determina la masa bruta del reactor lleno con la mezcla. En cada periodo programado, se pesa el reactor y, si fuera necesario, se restituye la masa inicial añadiendo agua. Cada 5 días se extraen los fragmentos del material de ensayo PET y PE son nuevamente pesados pues ya se sometieron a un periodo de tiempo determinado en el proceso de compostaje.

6.5 Evaluación de la degradación

Se evalúa la degradación a través del grado de desintegración de los plásticos tipo PET y PE estimado a través de la *Fórmula 1*. Esta fórmula se describe en la norma ISO 20200:2015 la cual establece los parámetros de estudios de desintegración de plásticos bajo condiciones simuladas de compostaje en una prueba a escala de laboratorio en condiciones aeróbicas. El cálculo de desintegración (D) considera la masa seca inicial del material de ensayo (m_i) y la masa final del material de ensayo (m_f) a través del tiempo, es decir, la masa final corresponde a cada una de las muestras ($D0, D10, \dots, D80, D90$) extraídas cada 5 días de los 90 días de ensayo, para un total de 18 Muestras. Cada m_i es pesada al inicio del ensayo asegurando un margen de error de $\pm 5 \times 10^{-3} g$.

$$D = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100$$

Fórmula 1. Grado de desintegración [64].

6.6 Espectroscopia de infrarrojo (FT-IR)

El MIRacle™ de PIKE perteneciente a Friedrich Alexander University Erlangen-Nürnberg, Department of Chemistry and Pharmacy de Alemania, fue el equipo utilizado para analizar las muestras poliméricas por espectroscopia de infrarrojo en el rango de 4000 a 400 cm^{-1} con una resolución de 4 cm^{-1} y 64 scans. El MIRacle™ es un accesorio universal de muestreo ATR (Reflexión Total Atenuada) para el análisis de sólidos, líquidos, pastas, geles y materiales intratables. En su configuración más popular, es un accesorio ATR de reflexión simple con un alto rendimiento de IR que lo hace ideal para la identificación de muestras dada la practicidad en su diseño de la placa de cristal, fácilmente cambiable, que permite el análisis de un amplio espectro de tipos de muestras, al tiempo que garantiza una longitud de trayectoria de muestreo constante. Tanto el material PET como el PE fueron estudiados por FTIR con la finalidad de identificar los grupos funcionales presentes en las muestras y su posible variación en el tiempo. El material de estudio elegido para este análisis fue seleccionado de tal forma que se tuviese una muestra representativa de todos los tiempos de muestreo durante la duración total de tiempo de contacto de las películas poliméricas con el compostaje; es decir, los 90 días que se tuvieron los reactores en condiciones controladas a nivel de laboratorio.

6.7 Termogravimetría (TGA)

La estabilidad térmica de las membranas (TGA) se examinó en atmósfera de aire utilizando un equipo TQ-500 de TA Instruments en el Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros (ICTP-CSIC) en Madrid, España. Los experimentos termogravimétricos se realizaron a una velocidad de calentamiento de 10 K min^{-1} desde 50 hasta una temperatura final de $600 \text{ }^\circ\text{C}$. Los fragmentos de muestras utilizados para el análisis con esta técnica corresponden a las mismas muestras que se emplearon para FTIR con el objetivo de garantizar la obtención de datos que abarcaran la totalidad del experimento y al tiempo permitir contrastar la información de TGA y FTIR.

6.8 Microscopía electrónica de barrido (SEM) y seguimiento de apariencia visual

Las imágenes de Microscopía electrónica de barrido (SEM) de las superficies de los plásticos tipos PET y PE se obtuvieron con un microscopio JEOL 3010 perteneciente a Friedrich Alexander University Erlangen-Nürnberg, Department of Chemistry and Pharmacy de Alemania. El seguimiento se hizo sobre las muestras sometidas al tratamiento de compostaje a través del tiempo, y los resultados fueron contrastados con otros análisis.

6.9 Análisis microbiológico de secuenciación profundo (NGS)

El estudio de diversidad microbiana (Metataxonómica) para bacterias, presentes en el compost preparado, mediante secuenciación masiva de fragmentos de PCR del gen 16S se realizó por el Centro Nacional de Secuenciación Genómica de la Universidad de Antioquia de Colombia. Para el experimento de secuenciación profundo se utilizó el gen ribosomal 16S, región variable V3 y V4. El secuenciación profundo se realizó en la plataforma MiSeq de Illumina, generando reads pareados de 300 bases cada uno. Los análisis de calidad de secuencias y clasificación se desarrollaron utilizando la plataforma MOTHUR en su última versión.

7. Metodología experimental

7.1 Evaluación de la degradación

El principal parámetro de evaluación en el estudio de degradación de las muestras plásticas tipo PET y PE fue el seguimiento del peso en el tiempo (90 días de tratamiento). Para determinar la variación en el peso de las muestras de plástico se guardó extremo cuidado en la medida del peso, y se garantizó que los cambios entre las muestras utilizadas no fueran superiores al orden de 10^{-4} g . Los resultados obtenidos mediante el diseño experimental planteado para este estudio y su

correspondiente modelamiento estadístico son mostrados en la *Figura 10*. Los resultados obtenidos mediante este modelamiento estadístico parecieran ser atípicos si se considera que las proyecciones son una tendencia a la pérdida de peso, en donde se tiene que los valores positivos que pueden observarse corresponden a la variación en peso, dado que el valor final (es decir, después del tratamiento) es $< 0,3830 \pm 5 \times 10^{-3}g$ para PET y $< 0,4220 \pm 5 \times 10^{-3}g$ para PE, dando a entender que corresponde a la disminución de peso. Por el contrario, los valores negativos que pueden observarse corresponden a la variación en peso donde el valor final (es decir, después del tratamiento) es $> 0,3830 \pm 5 \times 10^{-3}g$ para PET y $> 0,4220 \pm 5 \times 10^{-3}g$ para PE, corresponde al aumento de peso. Este último y, en coherencia al seguimiento visual que se realizó sobre las muestras estudiadas, puede asociarse a la adherencia del compost sobre el material de ensayo durante el tratamiento de compostaje, representado en variaciones estadísticas a través del tiempo que no permiten relacionar la pérdida de peso por efecto del compostaje sobre el material de ensayo tipo PET y PE.

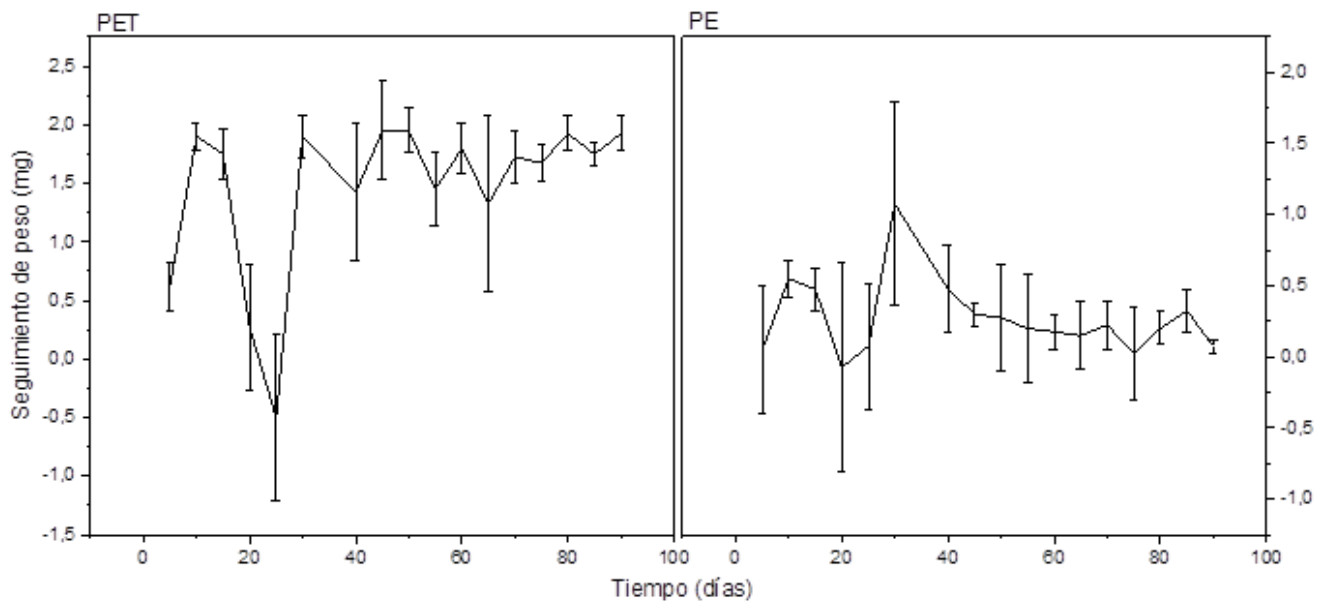


Figura 10. Seguimiento de peso de muestras plásticas en mg para PET y PE.

Empleando la *Fórmula 1* y en consideración de que para la norma ISO 20200:2015 el grado de desintegración se considera como la media de los grados de desintegración obtenidos para las réplicas: Los resultados obtenidos se presentan en la *Tabla 5*.

Tabla 5. Promedio de desintegración (D) a través del tiempo

Tiempo (días)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Muestra	M2	M4	M6	M8	M10	M12	M14	M16	M18
D (%) PET	0,46329	0,00650	0,48291	0,50244	0,47636	0,38501	0,4761	0,36554	0,44385
D (%) PE	-0,29610	-0,29023	-0,21929	-0,05924	-0,13625	-0,11253	0,00004	-0,14803	-0,02958

La variación de peso para el plástico tipo PET presenta un cambio estadísticamente significativo de D15 a D25 representado por valores negativos que se asocian principalmente a las condiciones de humedad de los primeros días de tratamiento al interior de los reactores dado que favorecía la acumulación. Por otro lado, la variabilidad que puede presenciarse a través del tiempo se relaciona con la adherencia del material de compost sobre la superficie de las muestras. El análisis estadístico permite indicar que al comparar los pesos iniciales del tratamiento (D0) y el peso final de las muestras en los reactores (D90) no existieron cambios estadísticamente significativos que permitan determinar un grado de desintegración. Sin embargo, se presenta un mayor promedio de desintegración (D) en el tipo de plástico PET, lo que puede indicar que, bajo las condiciones del estudio ejecutado, este tipo de plástico sujeto a variaciones más significativas que el PE en términos de variación de peso (disminución).

El comportamiento de la variación de peso para el plástico tipo PE presenta resultados negativos indicando que, contrario a lo supuesto, el peso de las muestras aumento durante el tiempo del compostaje. La obtención de valores negativos muestra que el valor final del peso fue superior al valor inicial lo que estadísticamente no mostraba cambios significativos según los supuestos iniciales del estudio. Lo sucedido en este sistema en particular se atribuye a las dimensiones de las muestras colocadas en los reactores, pues para cumplir con uno de los requerimientos de la norma (asegurar de 5 a 20g de material de ensayo), fue necesario cortar grandes láminas de plástico que cumplieren con el peso sugerido por la norma para cada reactor. Dichas dimensiones hicieron que las muestras tipo PE, comparadas con la del PET, tuviesen mayor área superficial en contacto con el compost permitiendo así mismo la adherencia de material de compost.

7.2 Evaluación de la degradación

Las *Figura 11* y *12* muestran el espectro IR de los plásticos tipo PET y PE, respectivamente. Las bandas identificadas en los dos sistemas de plásticos considerados en este estudio en función del tiempo de estudio son resumidas en las *Tablas 6* y *7*.

En el espectro infrarrojo del PET, sus bandas abarcan todo tipo de enlaces químicos, se encuentran entre las de mayor intensidad en 1714 cm^{-1} (banda de alta intensidad) que corresponde al estiramiento simétrico del grupo C=O [65], el grupo etileno 1342 cm^{-1} para la conformación trans; además, las bandas complejas situadas en $1224\text{-}1327$, $1063\text{-}1162$ y $1005\text{-}1032\text{ cm}^{-1}$ son también intensas [66], pertenecientes a algunas de las asignaciones otorgadas en la *Tabla 6*.

Tal como puede verse en la *Tabla 6*, varias de las bandas del PET fueron caracterizadas, pero al analizar el seguimiento entre D0, D30 y D90 no se observan cambios significativos. Sin embargo, se observa la aparición de bandas entre $1500\text{-}1570\text{ cm}^{-1}$ que pueden asociarse a anillo bencénico parasustituido [67] estiramiento C-C del anillo [68], vibración C-H del anillo en el plano [69] y a modos normales del benceno [70], estiramiento C-C del anillo [68] y conformación Gauche [71].

Por otro lado, la presencia de grupos CH_2 permite reafirmar que el material se trata de Polietileno Tereftalato (PET) [65]; este, al ser un grupo tan representativo y al no encontrar variaciones en las bandas caracterizadas como 848 , 1178 , 1342 y 1454 cm^{-1} podría atribuirse a que no se evidenció un proceso degradativo que generara algún tipo de alteración sobre los grupos funcionales del material polimérico de estudio; pues estas bandas se conservan a través del tiempo de estudio. Además, los espectros FTIR de PET muestran varias bandas dependiendo de los grupos funcionales presentes y de sus conformaciones trans y gauche que provocan diferentes orientaciones espaciales [70]. En consideración de que el PET se compone por monómeros unidos entre sí por enlaces tipo éster, al no encontrar diferencias significativas por las bandas que caracterizan este componente como 1178 y 1247 cm^{-1} [71] a través del tiempo, puede asociarse a que no existieron procesos degradativos que rompieran o generaran alteración sobre este tipo de enlaces químicos provocando la fragmentación química de los materiales.

Tabla 6. Principales absorciones espectrales de los grupos funcionales de PET

Número de Onda	Grupos Funcionales
720	Enlace alcano C-CH ₂ - [65]
795	C=O + CCO flexión [72]
848	CH ₂ vibración oscilante [73]
873	Vibración del anillo C-H [73]
971	Estiramiento C=O [71]
1017	Anillo C-H en deformación plana [73]
1178	Estiramiento C-O-C del éster [71]
1247	Estiramiento (C=O)-C del éster [71]
1342	Movimiento de CH ₂ [68]
1409	Estiramiento del anillo C-C [68]
1454	Flexión CH ₂ [73]
1505	Estiramiento C-C del anillo [68]
1714	Estiramiento C=O [65]

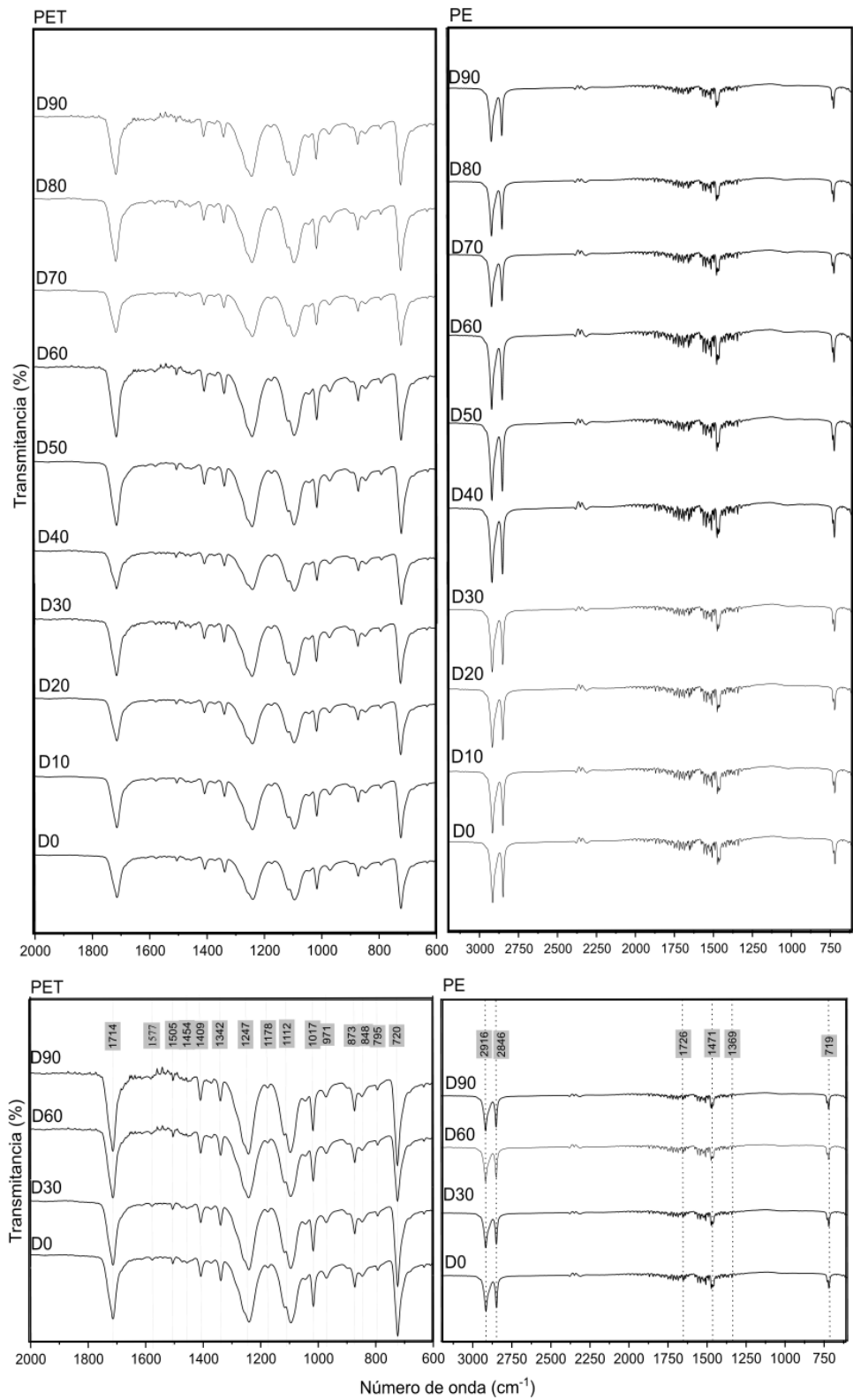


Figura 11 y 12. Espectro FTIR de PET (izquierda) y PE (derecha)

El análisis del espectro FTIR para las muestras poliméricas de PE están basados en las bandas más intensas de los espectros, los cuales se asocian con: el estiramiento C-H (2915,76 y 2846,97 cm^{-1}) [74], y las curvas (1462,69; 1375,58 y 729,35 cm^{-1}) [75] [72], que representan la presencia de alcanos (hidrocarburos) como único grupo funcional químico presente en las películas de PE [76].

Las bandas representativas para el PE identificadas por FT-IR no evidencian tampoco cambios importantes que se puedan asociar a efectos de degradación del material o cambios en su composición química. De hecho, lo que aquí se analiza se sustenta con la mayoría de los estudios de degradación de polímeros en compostaje, al señalar que cuando este tipo de materiales sufren efectos degradativos, las frecuencias en el FTIR proyectan la formación de grupos carbonilo e hidroxilo principalmente, indicando que consorcios microbianos o especies fúngicas han logrado colonizar partes superficiales del plástico [76]. De esta manera se advierte que los espectros de FTIR muestran que el polímero no ha sufrido cambios significativos en su estructura química en términos de aumento o disminución de las bandas existentes, ni tampoco la aparición de bandas nuevas.

Tabla 7. Principales absorciones espectrales de los grupos funcionales de PE

Número de Onda	Grupos Funcionales
719	Deformación Asimétrica en el plano de CH_2 (Balanceo-Rocking) [75]
1303-1356	Meneo CH_2 [72]
1369	Deformación Asimétrica en el plano de CH_2 (Balanceo-Rocking) [72]
1375	Deformación Simétrica de CH_3 (Flexión) [75]
1462	Deformación Asimétrica de CH_2 (Flexión) [72]
1471	Deformación de CH-CH_3 (Movimiento de tijera) [77]
2846	Estiramiento Simétrico de C-H (CH_3) [74]
2916	Estiramiento Asimétrico de C-H (CH_3) [74]

7.3 Termogravimetría (TGA)

El análisis termogravimétrico es uno de los métodos más utilizados métodos para dilucidar la descomposición térmica de los materiales poliméricos [78]. Las curvas termogravimétricas (TGA/DTG) para las muestras de plástico tipo PET y PE se muestran en las *Figura 13* y *14*, respectivamente. Estas permiten conocer el comportamiento de degradación térmica asociada a

despolimerización de los materiales considerando el cambio de peso de un material en función de la temperatura y el tiempo.

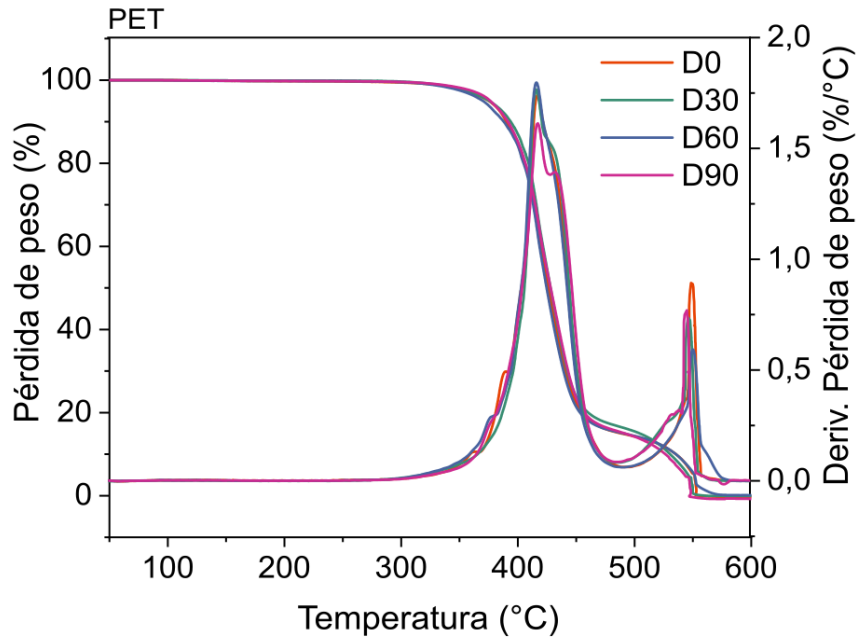


Figura 13. Curva TGA y DTG del PET

Los termogramas de las muestras de PET estudiadas mostraron en la *Figura 13* que la degradación global sufre un paso de pérdida de masa entre 350 C y 500 °C. Se observa la tasa de degradación máxima para todas las muestras a aproximadamente 430 °C. Esta pérdida de masa se atribuye a la degradación del polímero PET, es decir, a una escisión aleatoria de los enlaces de éster en la cadena principal que da lugar a la formación de diferentes oligómeros [78]. La pérdida de peso y las temperaturas máximas de degradación muestran una tendencia similar para todas las muestras de PET tratadas en condiciones de compostaje, indicando que la estabilidad térmica de las muestras PET no se vio afectada por el tratamiento de compostaje.

Se observa que la descomposición térmica del PET más significativa se da en el intervalo de temperaturas de 420°C – 480°C relacionado con la pérdida de compuestos volátiles, encontrando que el PET es térmicamente estable hasta 360°, estas muestras se descomponen totalmente a alta temperatura (> 500 °C) y el contenido de cenizas es bastante bajo ya que el polímero de PET está compuesto esencialmente de materia orgánica. [79]. Los picos DTG o Derivada de pérdida de peso se presentan en *D0*, *D30*, *D60* y *D90* en rangos de 416-118°C y 545-550°C, asociado al

máximo de temperatura. Sin embargo, esta pequeña variación puede estar asociada al margen de error del equipo utilizado para el estudio. Por otro lado, se presentan pérdidas aproximadas >80% de masa sin existir variaciones significativas en las muestras estudiadas a través del tiempo. La temperatura a las que la descomposición es completa para PET corresponde a 502 °C [80].

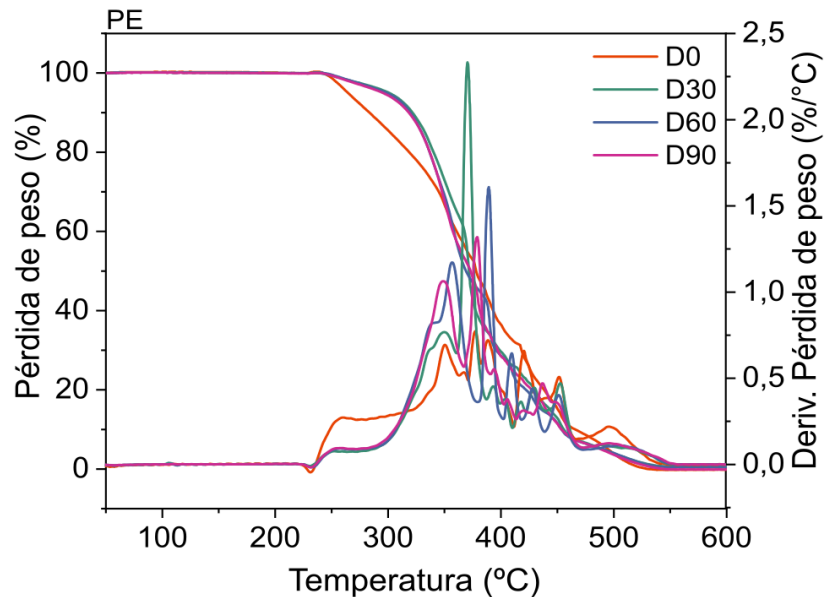


Figura 14. Curva TGA y DTG del PE

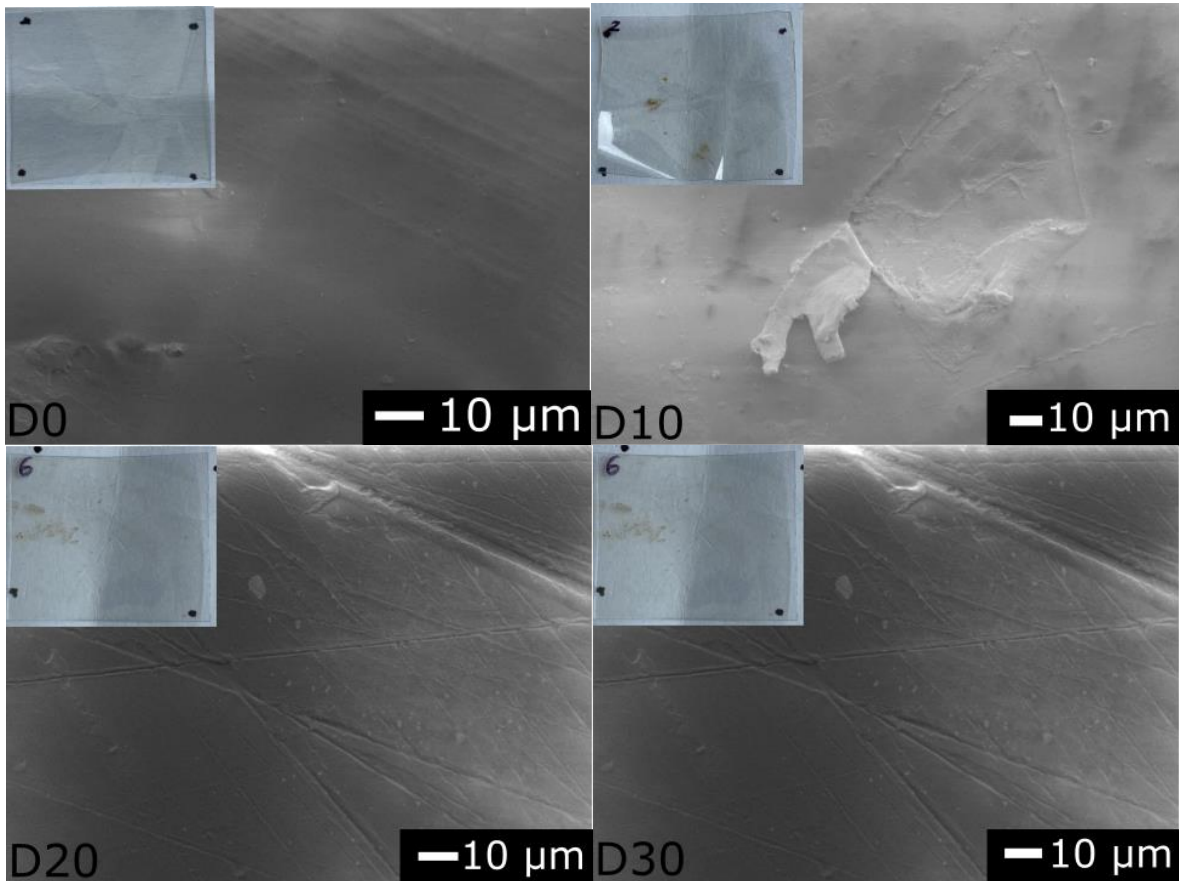
Los termogramas obtenidos para sistema PE muestran un comportamiento diferente a los sistemas de PET considerados anteriormente. El primer valor que llama la atención es la temperatura que corresponde a 350°C dado que estudios previos han logrado indicar que a este valor el polietileno se transforma a un material de consistencia cerosa asociados a la pérdida de agua por procesos de desorción y secado más que a la producción de compuestos volátiles [81].

Aunque la estabilidad térmica del plástico PE no muestra una variabilidad, las curvas de TGA para este sistema si presentan diferencias respecto al PET. El termograma obtenido para este sistema proyecta múltiples máximos en los que según la DTG son los valores de temperatura en los que el polímero se degrada. Este comportamiento es algo inusual si lo comparamos con las muestras PET donde el termograma conserva cierta uniformidad. Este hecho se asocia principalmente a que las láminas que se utilizaron de PET tenían dimensiones mucho más grandes que las de PET por tanto el material de compost podía adherirse en más partes de la superficie. Con lo anterior y dada la imposibilidad de asegurar que todos los trozos utilizados para el análisis

por TGA fueron cortados en la misma ubicación en cada una de las muestras y que probablemente en estas existieran diferentes cantidades de compost acumulado, los termogramas presentaron máximos en diferentes valores de temperatura como evidencia lo anterior.

7.4 Microscopía electrónica de barrido (SEM) y seguimiento de apariencia visual

El seguimiento a cambios asociados a posibles procesos de degradación de las muestras tratadas en compost para los plásticos tipo PET y PE se realizaron usando Microscopia Electrónica de Barrido. Las imágenes de microscopia fueron también comparadas con las muestras del seguimiento fotográfico (localizadas en los recuadros al lado superior izquierdo) durante el tiempo de tratamiento. Estas imágenes son mostradas en las *Figura 15* y *16* respectivamente.



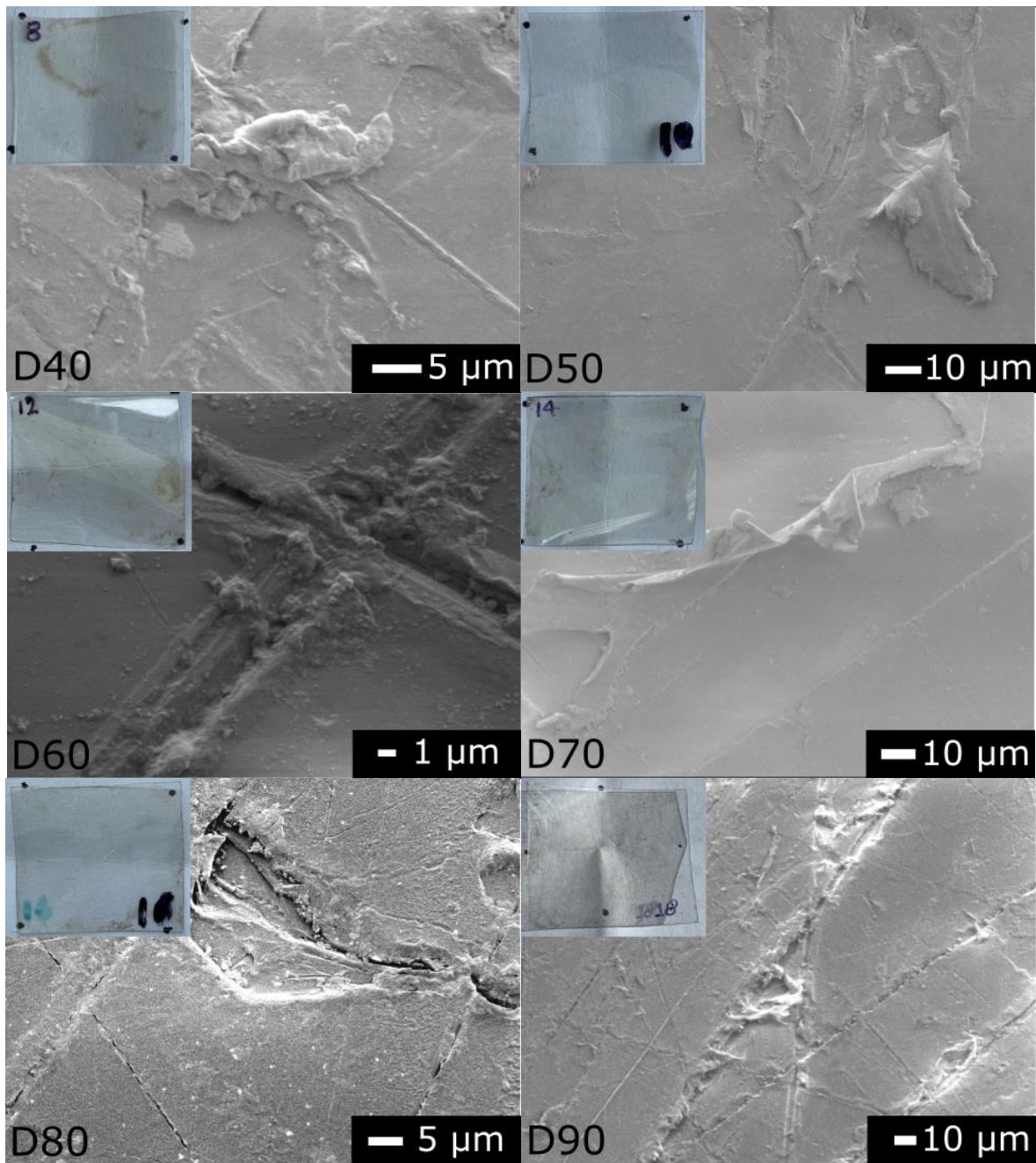
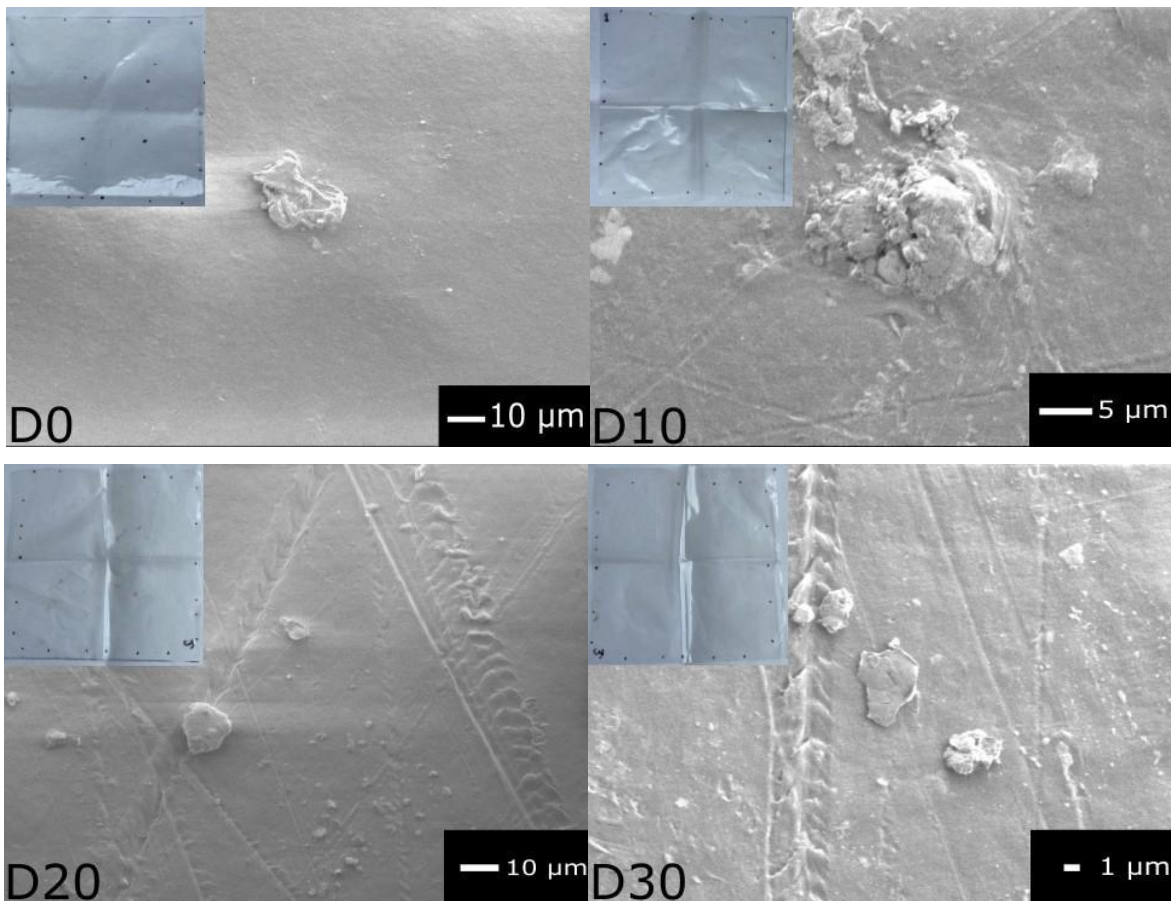


Figura 15. Seguimiento SEM y Apariencia visual para PET

Desde el seguimiento fotográfico se pueden apreciar diferencias entre la muestra D0 y muestra D90 principalmente asociado a cambios en la opacidad de la muestra al final del tratamiento (D90). Desde la evaluación de apariencia visual al final del estudio, es claramente apreciable un cambio en el color hacia una tonalidad marrón. Esto posiblemente asociado al mayor tiempo de exposición y contacto de la muestra al compost, lo que causó su adherencia a la superficie del plástico.

Las imágenes SEM para PET, que pueden verse en la *Figura 15*, de las muestras a menores tiempo de tratamiento D0 - D30 muestran superficies lisas, no son apreciadas rugosidad o irregulares sobre la superficie del plástico. Sin embargo; al final del ensayo la muestra evidencia cierta rugosidad en la superficie, que puede estar asociado a la acumulación por adherencia del compost, principalmente en aquellas zonas de la superficie de la muestra donde se presentan ciertos canales (cortes o rayones por efecto del uso del plástico), donde son observadas la formación de costras indicando acumulación de material del compostaje, tal como puede evidenciarse en las muestras D40 en adelante, con una mayor evidencia de esta observación para las muestras D80 – D90.

Sin embargo, al contrastar los resultados con la Evaluación de la degradación (7.1) puede evidenciarse que, a pesar de presentar adherencia del compost sobre la superficie, los valores de seguimiento de peso de las muestras plásticas PET (*Figura 10*), tiende a la disminución del peso en especial después de los 25 días de tratamiento; lo podría estar asociado a algún tipo de descomposición del plástico en este periodo de tiempo.



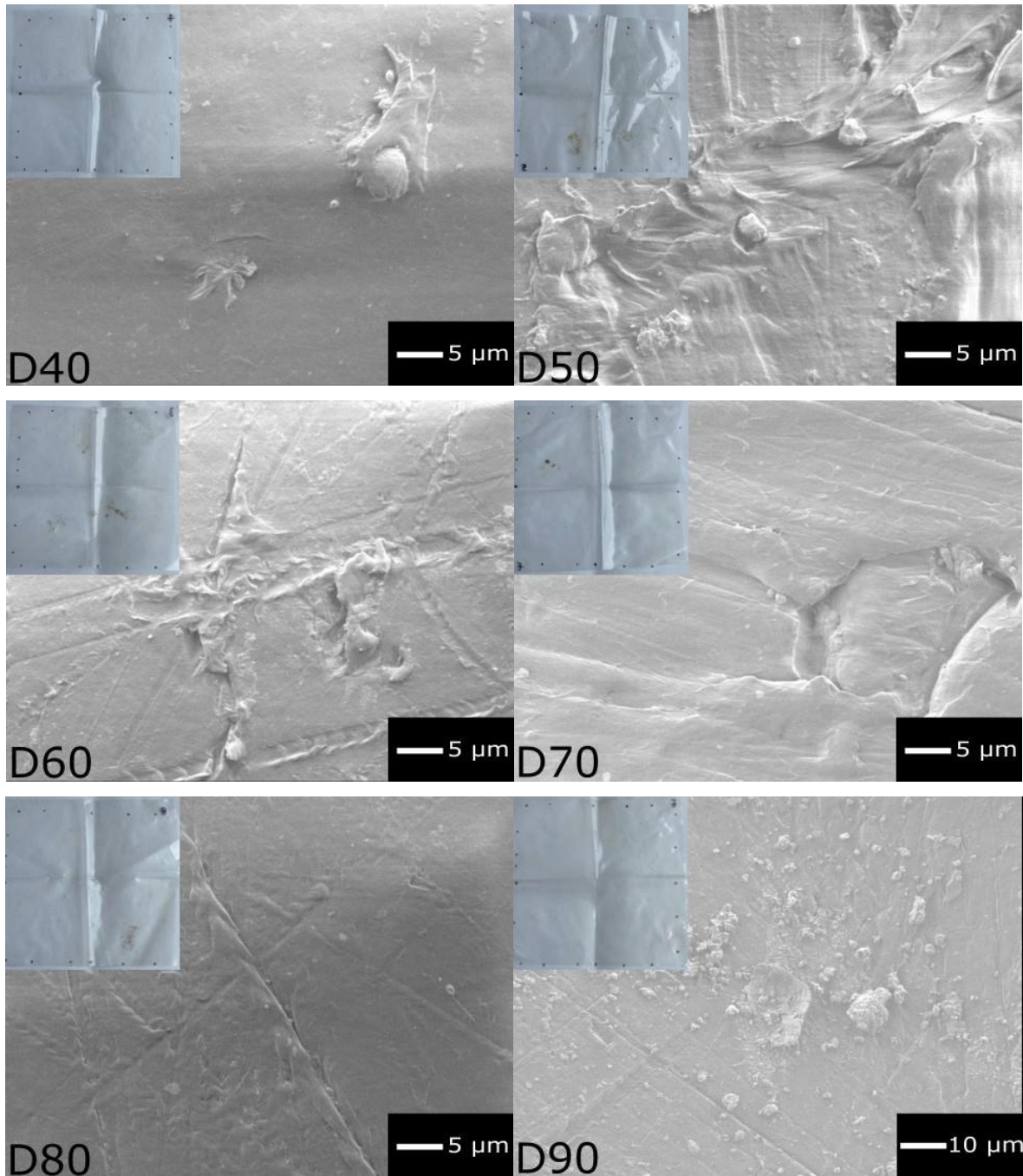


Figura 16. Seguimiento SEM y Apariencia visual para PE

Similar al comportamiento descrito en las muestras PET, el sistema PE muestra desde los primeros muestreos, cambios en el color de la superficie de las muestras tratadas en compostajes. Sin embargo; contrario al sistema PET, los plásticos tipo PE no son completamente lisos y poseen

un mayor grado de flexibilidad lo que hace que el plástico, durante su vida útil, sufra muchos más daños que se materializan sobre su superficie y es precisamente lo que se aprecia en el seguimiento fotográfico.

Por efecto de estas características posiblemente se obtenga la acumulación de material orgánico desde el compost de manera rápida sobre los plásticos, como se observa desde el muestreo D10 donde ya empieza a advertirse la acumulación de material de compostaje. Otro efecto comparativo entre los sistemas es que en el tipo PE se evidencia un cambio más notable en la tonalidad del color, fenómeno asociado principalmente a que en este sistema las muestras tenían dimensiones de casi el doble a las del sistema PET lo que garantizaba que más cantidad de plástico estuvo en contacto completo con el material de compostaje contenido en los reactores.

7.5 Análisis microbiológico de secuenciamiento profundo (NGS)

La actividad y diversidad del microbiota son algunas de las condicionantes en la fertilidad, estabilidad y funcionamiento de ecosistemas y agroecosistemas. La diversidad microbiana es esencial para garantizar los ciclos de nutrientes y procesos de descomposición del material vegetal en cualquier ecosistema terrestre debido a que procesos biológicos tales como, oxidación, reducción, descomposición de materia orgánica y mineralización, así como, interacciones interespecíficas e intraespecíficas que se establecen, están reguladas por microorganismos que habitan en ese nicho [82]. Estudios microbiológicos de este tipo tienen como objetivo identificar la diversidad de organismos microbianos, genes, variantes y funciones metabólicas que caracterizan la comunidad microbiana que habita una muestra medio ambiental, y en este caso particular para comprender las dinámicas microbianas del compost utilizado para el estudio.

Se presenta la asignación en los rangos taxonómicos de filo, familia y género para la comunidad bacteriana de compost a base de pulpa de café en las *Figura 17, 18 y 19* respectivamente; a través del análisis de secuenciación del gen 16S rRNA de alto rendimiento a lo largo de la inoculación del cultivo iniciador.

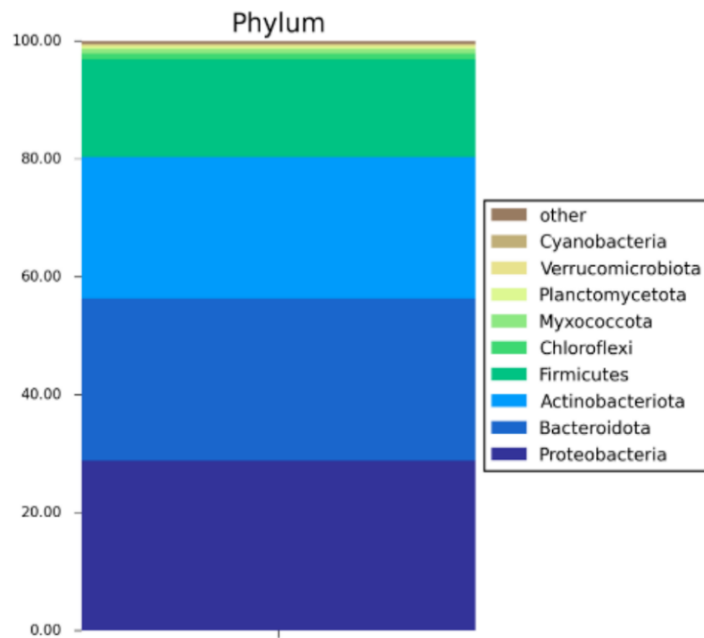


Figura 17. Frecuencia de la asignación taxonómica a nivel de filo

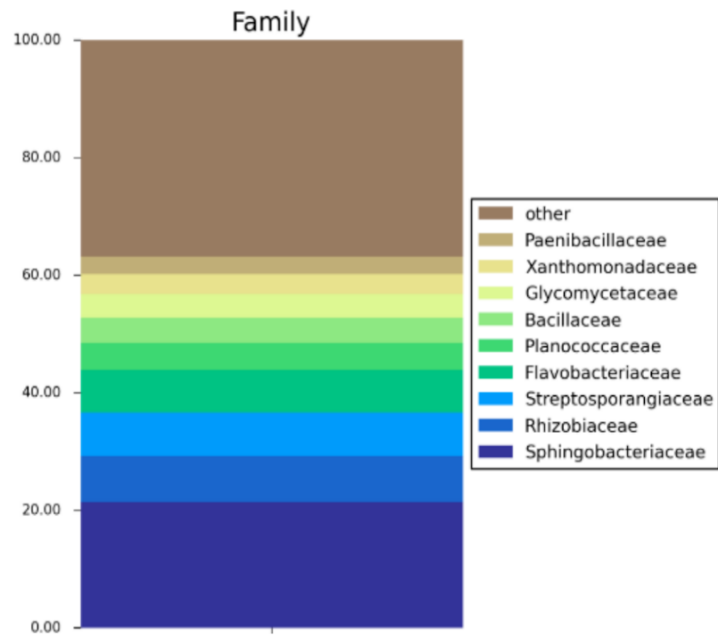


Figura 18. Frecuencia de la asignación taxonómica a nivel de familia

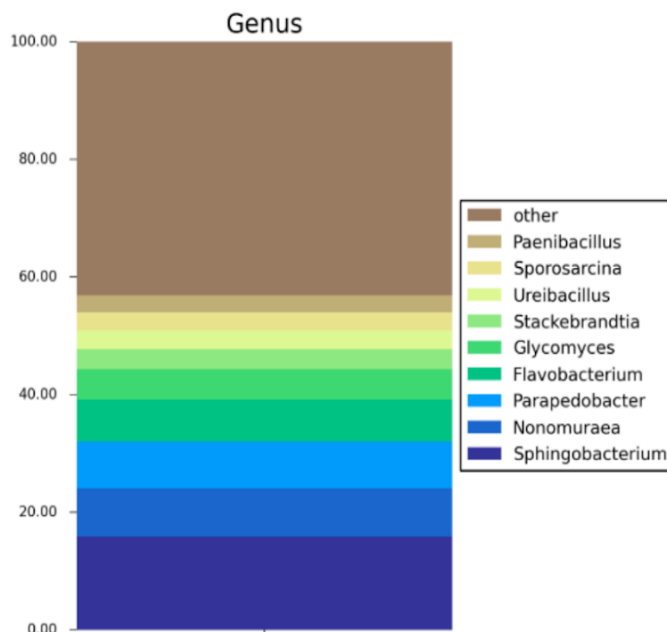


Figura 19. Frecuencia de la asignación taxonómica a nivel de género

Los microorganismos, tanto hongos como bacterias, tienen el potencial de crecer en polímeros. Hay pocos informes sobre la biodegradación del PET, la mayoría de los cuales están relacionados, entre otras cosas, con la degradación enzimática del plástico, incluyendo la despolimerización a través de la hidrólisis, la alcoholólisis, la glicólisis, la amonólisis y la aminólisis, y estos informes suelen emplear enzimas aisladas de microorganismos [83].

El PET está compuesto por monómeros unidos entre sí mediante enlaces tipo éster. Consecuentemente, aquellos microorganismos que posean enzimas hidrolíticas capaces de atacar y romper estos enlaces podrían generar compuestos de bajo peso molecular (monómeros) asimilables por la célula. Además, es importante considerar que la capacidad de los microorganismos para degradar el PET va a depender de sus propiedades fisicoquímicas (movilidad de cadenas del polímero determinada por el grado de cristalinidad, diferencia de temperatura de degradación, y temperatura de fusión) por lo que, no todos los tipos de PET son igualmente susceptibles a la degradación [84].

Se ha establecido que la capacidad degradativa de los plásticos tipo PET por las bacterias se debe a la capacidad de producción de dos enzimas hidrolíticas, denominadas PETasa y MHETasa,

que atacan al polímero y a sus intermediarios para transformarlos en monómeros fácilmente asimilables por la célula [85]. Entre algunas de las bacterias caracterizadas a nivel de filo (*Figura 17*), que estudios han destacado por su capacidad degradativa de plásticos, se encuentran las *Cyanobacterias* [86], *Verrucomicrobiotas* [87]; por otro lado, entre algunas de las bacterias caracterizadas a nivel de familia (*Figura 18*), se encuentran *Bacillaceae* [88], *Planococcaceae* [89]; y, finalmente, entre algunas de las bacterias caracterizadas a nivel de género (*Figura 19*), se encuentran *Paenibacillus* [90], *Ureibacillus* [91]. Gracias a esto puede contrastarse con el estudio efectuado que el compost con pulpa de café como sustrato presenta las características físicoquímicas y biológicas que facilitan el crecimiento de microorganismos que potencialmente podrían llegar a degradar el PET, tal como se ha comprobado en estudios bajo diferentes condiciones de tratamiento como la aplicabilidad de las microalgas y las cianobacterias a la biodegradación de plásticos [86], las bacteroidales en degradación global del tereftalato de polietileno (PET) [87], colonización y degradación de los desechos plásticos marinos [88]; y otros estudios de importante información microbiológica como la formación de biopelículas y sus implicaciones en las propiedades y el destino de los microplásticos en medios acuáticos [89], la distribución filogenética de los microorganismos que degradan el plástico [90] y microorganismos de la plastisfera y la biodegradación del plástico por la microbiota digestiva de diferentes insectos [91].

Para el caso del sistema PE cualquier cambio físico o químico en este polímero generado por factores ambientales, como luz, calor, humedad, condiciones químicas o actividad biológica, dan como resultado la escisión de enlaces y cambios en las propiedades del polímero representado cambios en el deterioro de la funcionalidad del plástico [92].

Se ha reportado que los mecanismos principales para la biodegradación del PE incluyen la oxidación o hidrólisis por enzimas para crear grupos funcionales que mejoran su hidrofilia. Las principales cadenas de polímero se degradan, lo que da como resultado un polímero de bajo peso molecular y las propiedades mecánicas son bastante débiles, lo que lo hace más accesible para una mayor asimilación microbiana [93]. Hay evidencia de varias bacterias que degradan el PE, las cuales han sido aisladas en su mayoría de vertederos y diversos hábitats como el mar y bosques de manglares. En la actividad de degradación para las bacterias se ha conseguido valores de $(35.72 \pm 4.01) \%$ y $(20.28 \pm 2.30) \%$ atribuida a la cepa A5, a (MG645264) de *Bacillus cereus* y la cepa

B2,2 (MG645267) de *Brevibacillus borstelensis*, respectivamente; *Microbacterium paraoxydans* degradó el 61.0 % del PEBD mientras que *Pseudomonas aeruginosa* degradó el 50.5 % en dos meses [94]. Los hongos también representan una buena alternativa de degradación al poseer ventajas como la capacidad de sobrevivir en ambientes con baja disponibilidad de nutrientes, pH bajo y baja humedad como se ha informado que el hongo *Zalerion maritimum* es capaz de utilizar PE, contribuyendo en la disminución, tanto en masa como en tamaño, de los gránulos. Estos resultados indican que puede contribuir activamente a la biodegradación de los microplásticos, requiriendo un mínimo de nutrientes [95]. El estudio microbiológico realizado al compost utilizado en este estudio muestra que existe una amplia variedad microbiana que, de estar en condiciones óptimas al interior de los reactores, podría empezar procesos degradativos fuertes sobre el PE con tiempos más prolongados de exposición y acondicionamiento previo de las muestras.

8. Conclusiones

Bajo las condiciones de estudio no se evidenció un proceso de degradación con gran significancia para los plásticos analizados tipo PET y PE, sería relevante evaluar las condiciones de pretratamiento para las muestras plásticas para la posible obtención de resultados con mayores efectos sobre los polímeros.

Se examinaron las tecnologías de reciclaje de plásticos más utilizados en la actualidad y sus porcentajes de eficiencia basados en la cantidad de material reciclado. Esta revisión permitió entender que las dinámicas de reciclaje aún se encuentran muy por debajo de las metas propuestas por aquellos gobiernos que han decidido reafirmar su compromiso ambiental al ser catalogados como grandes generadores de residuos plásticos y como una estrategia para impulsar los proyectos de la responsabilidad extendida al consumidor.

El plástico tipo PET y PE son los materiales que se producen a mayor escala en la industria del polímero principalmente por sus propiedades de resistencia y durabilidad que los hacen idóneos para ser utilizados como piezas de ensamble y material de empaque dada la capacidad de cumplir cualquier función por la facilidad de moldearlos hasta encontrar la forma deseada. Sin embargo; no son sus propiedades las que hacen particular a este producto, es la producción de estos como un plástico de un solo uso.

De esta manera, motivados por el contexto agrícola colombiano y en particular de la región caldense donde la mayor parte de los suelos son destinados para la plantación de café, se evaluó el grado de desintegración del plástico tipo PE y tipo PET en condiciones de compostaje a base de pulpa de café durante 90 días. Para determinar esta degradación se utilizaron técnicas de análisis como FTIR, SEM, TGA, análisis estadístico y caracterización microbiológica del compost.

Aunque los resultados nos sugieren que todos los valores obtenidos en cada uno de los muestreos son estadísticamente iguales entre sí, las otras técnicas complementarias han mostrado que los procesos de degradación han tenido comienzo y su desarrollo es lento en las condiciones de operación que se tuvieron en cuenta para el proceso. Los resultados aquí obtenidos se han contrastado con estudios previos realizados, ejercicio que ha permitido concluir que las muestras deben ser sometidas a algún tipo de pretratamiento (Fotooxidación o Radiación Ultravioleta) de tal forma que se logre modificar la naturaleza del polímero y alterar su cristalinidad permitiendo que los microorganismos puedan colonizar la matriz polimérica de una manera más sencilla y eficiente.

Por otro lado, los resultados de análisis microbiológico muestran que en el compost utilizado existe una amplia diversidad microbiana y lo que se sugiere en este punto es que tal vez es posible analizar con más detalle cada uno de los microorganismos y su potencial de degradación estos polímeros hasta lograr que sean aislados y correr nuevos experimentos basados en un mismo microorganismo y variaciones de las condiciones del tratamiento.

Este estudio en específico consideró condiciones experimentales puntuales a partir de las cuales se pueden formular trabajos futuros. La modificación de estas condiciones y las variables que fueron controladas pueden crear infinidad de escenarios posibles donde la biodegradación de los polímeros sea posible. Particularmente se sugiere llevar control de pH en tanto el seguimiento a esta propiedad nos pueda dar información del comportamiento de la actividad biológica como información importante para el entendimiento global del sistema.

9. Referencias

- [1] L. A. Chávez Zenteno, "Chávez-Zenteno, L. A. (2019). Comunicación visual arte y crítica al uso excesivo de plásticos descartables .", Master Universitario, Universidad Internacional de la Rioja, Lima, 2019.
- [2] C. Torres de la Torre, "El futuro de los plásticos o los plásticos del futuro," Cuad. Cent. Estud. Diseño Comun., no. 87, 2020.
- [3] Plastic & health: The hidden costs of a plastic planet, 6a ed. Washington, DC: Center for International Environmental Law, 2019.
- [4] M. Llorca et al., "Microplastics in Mediterranean coastal area: toxicity and impact for the environment and human health," Tren. Environ. Anal. Chem., vol. 27, no. e00090, p. e00090, 2020.
- [5] O. Delgado Fimia, "Implicaciones de la exposición a microplásticos en salud humana. Revisión bibliográfica," Editorial de la Universidad de Granada, 2020.
- [6] J. Barbir et al., "Assessing the levels of awareness among European citizens about the direct and indirect impacts of plastics on human health," Int. J. Environ. Res. Public Health, vol. 18, no. 6, p. 3116, 2021.
- [7] A. T. Maldonado, La complejidad de la problemática ambiental de los residuos plásticos: una aproximación al análisis narrativo de política pública en Bogotá. Bogotá, Colombia, 2012.
- [8] Y.-H. V. Soong, M. J. Sobkowicz, and D. Xie, "Recent advances in biological recycling of polyethylene terephthalate (PET) plastic wastes," Bioengineering (Basel), vol. 9, no. 3, p. 98, 2022.
- [9] J. Arandes, J. Bilbao, and D. López, "Reciclado de residuos plásticos," Revista Iberoamericana de polímeros, vol. 5, no. 1, pp 28–45, 2004.
- [10] H. F. Sandra and C. G. L. Rocío, "Reflexiones sobre la importancia económica y ambiental del manejo de residuos en el siglo XXI," Revista de tecnología, vol. 15, no. 1, pp. 57–76, 2016.
- [11] Y.-B. Zhao, X.-D. Lv, and H.-G. Ni, "Solvent-based separation and recycling of waste plastics: A review," Chemosphere, vol. 209, pp. 707–720, 2018.

- [12] D. Pan, F. Su, C. Liu, and Z. Guo, "Research progress for plastic waste management and manufacture of value-added products," *Adv. Compos. Hybrid Mater.*, vol. 3, no. 4, pp. 443–461, 2020.
- [13] J. C. Prata et al., "Solutions and integrated strategies for the control and mitigation of plastic and microplastic pollution," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 16, no. 13, p. 2411, 2019.
- [14] C. Abrusci, J. L. Pablos, T. Corrales, J. López-Marín, I. Marín, and F. Catalina, "Biodegradation of photo-degraded mulching films based on polyethylenes and stearates of calcium and iron as pro-oxidant additives," *Int. Biodeterior. Biodegradation*, vol. 65, no. 3, pp. 451–459, 2011.
- [15] J. M. Suárez Agudelo, *Aprovechamiento de los residuos sólidos provenientes del beneficio del café, en el municipio de Betania Antioquia: usos y aplicaciones*. 2012.
- [16] G. Blandon C., N. Rodriguez V., and M. T. Davila A., "Caracterización microbiológica y físico química de los subproductos del beneficio del café en proceso de compostaje," *Cenicafe*, 1998.
- [17] R. U. Halden, "Plastics and health risks," *Annu. Rev. Public Health*, vol. 31, no. 1, pp. 179–194, 2010.
- [18] F. A. Cristán, L. I. Ize, and G. A. Gavilán, "La situación de los envases en México," pp. 67–82, 1969.
- [19] D. S. Loaiza Arcila, "Análisis de la aplicación de microorganismos para la degradación de plásticos", Tesis de especialista, FACULTAD DE INGENIERÍA, FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA, BOGOTÁ, 2022. [En línea]. Disponible: <http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8964>
- [20] M. Jefferson, "Whither Plastics?—Petrochemicals, plastics and sustainability in a garbage-riddled world," *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 56, no. 101229, p. 101229, 2019.
- [21] R. R. Cobos and Departamento de Medicina Física y Rehabilitación. *Hidrología Médica*, Facultad de Medicina, Universidad Complutense, Madrid, España, "El polietilén tereftalato (PET) como envase de aguas minerales," *Bol. Soc. Esp. Hidrol. Med.*, vol. 31, no. 2, pp. 179–190, 2016.

- [22] Y. S. Oliveros-Oliveros and J. B. Zambrano-Beltrán, "Consecuencias económicas de la prohibición del Plástico en Colombia", Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas. Programa de Economía, Bogotá, 2021.
- [23] F. E. Quijano Carrasco, "Análisis tecno-económico para una planta de reciclaje químico de desperdicio de PET", Trabajo de grado, Colegio de Ciencias e Ingeniería, Universidad San Francisco de Quito, Quito, 2022.
- [24] D. F. Suasnavas Flores, "Degradación de materiales plásticos "PET" (polyethylene terephthalate), como alternativa para su gestión", Bachelor Thesis, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Quito, 2017. Disponible: <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/13224>
- [25] V. Sinha, M. R. Patel, and J. V. Patel, "Pet waste management by chemical recycling: A review," J Polym Environ, vol. 18, no. 1, pp. 8–25, 2010.
- [26] H. B. Magallón González, "Proyecto de inversión para una empresa de bolsa reciclada de polietileno de baja densidad", Maestría en Educación, Facultad de Contaduría y Ciencias Administrativas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, , Morelia, 2013. [En línea]. Disponible: http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/6103
- [27] T. R. Walker y D. Xanthos, "A call for Canada to move toward zero plastic waste by reducing and recycling single-use plastics", Resources, Conservation and Recycling, vol. 133, pp. 99–100, junio de 2018. Accedido el 13 de diciembre de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.014>
- [28] I. E. Roca Girón, "Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad (PEAD)", Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Química, Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, 2005.
- [29] B. R. Rodríguez, "El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental," Boletín iE, pp. 91–97, 2003.
- [30] M. Kedzierski, D. Frère, G. Le Maguer, and S. Bruzaud, "Why is there plastic packaging in the natural environment? Understanding the roots of our individual plastic waste management behaviours," Sci. Total Environ., vol. 740, no. 139985, p. 139985, 2020.

- [31] M. K. Eriksen, J. D. Christiansen, A. E. Daugaard, and T. F. Astrup, "Closing the loop for PET, PE and PP waste from households: Influence of material properties and product design for plastic recycling," *Waste Manag.*, vol. 96, pp. 75–85, 2019.
- [32] P. Bustamante, "La degradación de los plásticos," *Revista Universidad EAFIT*, vol. 30, no. 94, pp. 67–86, 1994.
- [33] Walker, S., & Rothman, R. (2020). Life cycle assessment of bio-based and fossil-based plastic: A review. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121158.
- [34] T. D. Nielsen, J. Hasselbalch, K. Holmberg, and J. Stripple, "Politics and the plastic crisis: A review throughout the plastic life cycle," *Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ.*, vol. 9, no. 1, 2020.
- [35] H. Li et al., "Expanding plastics recycling technologies: Chemical aspects, technology status and challenges," *ChemRxiv*, 2022.
- [36] M. A. Vargas Santillán, "Análisis de reciclado químico de plásticos (PE y PET) para la obtención de productos con valor agregado en México", Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, 2019.
- [37] Aznar, M. P., Caballero, M. A., Sancho, J. A., & Francés, E. (2006). Plastic waste elimination by co-gasification with coal and biomass in fluidized bed with air in pilot plant. *Fuel processing technology*, 87(5), 409-420.
- [38] K. Shkurupiy and O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, "Problems of doing small and medium-sized business in Ukraine in the context of solving the unemployment problem," *Комунальне господарство міст*, vol. 2, no. 148, pp. 58–62, 2019.
- [39] A. Kijo-Kleczkowska and A. Gnatowski, "Recycling of plastic waste, with particular emphasis on thermal methods—review," *Energies*, vol. 15, no. 6, p. 2114, 2022.
- [40] S. M. Emadian, T. T. Onay, and B. Demirel, "Biodegradation of bioplastics in natural environments," *Waste Manag.*, vol. 59, pp. 526–536, 2017.
- [41] Å. M. Ronkvist, W. Xie, W. Lu, and R. A. Gross, "Cutinase-catalyzed hydrolysis of poly(ethylene terephthalate)," *Macromolecules*, vol. 42, no. 14, pp. 5128–5138, 2009.

- [42] H. Bhardwaj, R. Gupta, and A. Tiwari, "Communities of microbial enzymes associated with biodegradation of plastics," *J Polym Environ*, vol. 21, no. 2, pp. 575–579, 2013.
- [43] S. Kubowicz and A. M. Booth, "Biodegradability of plastics: Challenges and misconceptions," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 51, no. 21, pp. 12058–12060, 2017..
- [44] K. Janczak, K. Hryniewicz, Z. Znajewska, and G. Dąbrowska, "Use of rhizosphere microorganisms in the biodegradation of PLA and PET polymers in compost soil," *Int. Biodeterior. Biodegradation*, vol. 130, pp. 65–75, 2018.
- [45] T. Leejarkpai, U. Suwanmanee, Y. Rudeekit, and T. Mungcharoen, "Biodegradable kinetics of plastics under controlled composting conditions," *Waste Manag.*, vol. 31, no. 6, pp. 1153–1161, 2011.
- [46] K. Z. Nieves Vilchez, "Efecto de dos abonos orgánicos a base de pulpa de café en el sustrato y el crecimiento vegetativo de plantones de café (*coffea arabica* l.) en vivero", Tesis de Grado, Facultad en Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Centro de Perú, Satipo, 2011. Disponible: <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/4012>
- [47] G. Peñaranda, G. Montenegro, and A. Giraldo, "Exploitation of agroindustrial waste in Colombia," *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, vol. 8, no. 2, pp. 141–150, 2017.
- [48] Y. Fernández-Cortés, K. D. Sotto-Rodríguez y L. A. Vargas-Marín, "Impactos ambientales de la producción del café, y el aprovechamiento sustentable de los residuos generados", *Producción + Limpia*, vol. 15, n.º 1, pp. 93–110, agosto de 2020. Disponible: <https://doi.org/10.22507/pml.v15n1a7>
- [49] A. Terry, S. Rodríguez, R. Bermúdez, M. Fernández, I. Aguilera y J. Buzón, "Evaluación de un inóculo para el arranque de reactores UASB empleados en el tratamiento de residual líquido de café", *Revista Cubana de Química*, vol. 17, n.º 1, pp. 206–211, 2005.
- [50] S. F. de Sá, S. M. da Cruz, M. E. Callapez y V. Carvalho, "Plastics that made history - the contribution of conservation science for the history of the Portuguese Plastics Industry", *Conservar Património*, mayo de 2020. Disponible: <https://doi.org/10.14568/cp2019017>

- [51] B. H. Stuart, *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications (Analytical Techniques in the Sciences (AnTs) *)*. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd, 2004. [En línea]. Disponible: <http://books.google.com>
- [52] S. Krimm, "Infrared spectroscopy and polymer structure", *Pure and Applied Chemistry*, vol. 16, n.º 2-3, pp. 369–388, enero de 1968. Disponible: <https://doi.org/10.1351/pac196816020369>
- [53] "FTIR spectroscopy - theory and fundamentals," JASCO Inc, 11-Mar-2020. [Online]. Available:<https://jascoinc.com/learning-center/theory/spectroscopy/fundamentals-ftir-spectroscopy/>. [Accessed: 02-Nov-2022].
- [54] I. Aracil Sáez, "Formación de contaminantes y estudio cinético en la pirólisis y combustión de plásticos (pe, pvc y pcp)", Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Alicante, Alicante, 2008. Disponible: <http://hdl.handle.net/10045/9608>
- [55] E. Rodríguez y E. Villegas, "Caracterización de polímeros aplicando el método termogravimétrico", *Métodos y Materiales*, vol. 2, n.º 1, pp. 25–32, 1969. Disponible: <https://doi.org/10.15517/mym.v2i1.13470>
- [56] Y. A. Granados Cristancho, "Importancia de los ensayos TGA y DSC en el estudio de las propiedades térmicas de mezclas asfálticas", Trabajo de grado, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José De Caldas, Bogotá D.C, 2015. Disponible: <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/3709>
- [57] A. Terry, S. Rodríguez, R. Bermúdez, M. Fernández, I. Aguilera y J. Buzón, "Evaluación de un inóculo para el arranque de reactores UASB empleados en el tratamiento de residual líquido de café", *Revista Cubana de Química*, vol. 17, n.º 1, pp. 206–211, 2005.
- [58] J. Clavijo, "Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM)", *ELEMENTOS*, vol. 3, n.º 3, 2013. Disponible: <https://doi.org/10.15765/e.v3i3.420>
- [59] H. Durgun y G. Bayram, "Improvement of adhesion between poly(ethylene terephthalate) and polyethylene", *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 19, n.º 6, pp. 407–425, 2005. Disponible: <https://doi.org/10.1163/1568561054352559>

- [60] D. Adamcová et al., "SEM Analysis and Degradation Behavior of Conventional and Bio-Based Plastics During Composting", *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, vol. 66, n.º 2, pp. 349–356, 2018. Disponible: <https://doi.org/10.11118/actaun201866020349>
- [61] "Servicio de metagenómica para perfilado de comunidades microbiana," IBIAN Technologies, 12-Jul-2017. [Online]. Available: <https://www.ibiantech.com/next-generation-sequencing-ngs/>. [Accessed: 16-Nov-2022].
- [62] S. Rubio, R. A. Pacheco-Orozco, A. M. Gómez, S. Perdomo y R. García-Robles, "Secuenciación de nueva generación (NGS) de ADN: presente y futuro en la práctica clínica", *Universitas Médica*, vol. 61, n.º 2, abril de 2020. Disponible: <https://doi.org/10.11144/javeriana.umed61-2.sngs>
- [63] J. E. Paolini Gomez, "Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos", *Revista Terra Latinoamericana*, vol. 36, n.º 1, p. 13, enero de 2018. Disponible: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i1.257>
- [64] Determination of the Degree of Disintegration of Plastic Materials Under Simulated Composting Conditions in a Laboratory-Scale Test, ISO 20200:2015, Normalización Española, 2016.
- [65] R. Mendoza Quiroga y W. Velilla Díaz, "Metodología para la caracterización termo-mecánica de películas plásticas biodegradables", *Prospectiva*, pp. 46–51, 2011.
- [66] M. Djebara, J. P. Stoquert, M. Abdesselam, D. Muller y A. C. Chami, "FTIR analysis of polyethylene terephthalate irradiated by MeV He⁺", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 274, pp. 70–77, 2012. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.11.022>
- [67] C. Liu et al., "Study of effects in polyethylene terephthalate films induced by high energy Ar ion irradiation", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 169, n.º 1-4, pp. 78–82, 2000. Disponible: [https://doi.org/10.1016/s0168-583x\(00\)00020-3](https://doi.org/10.1016/s0168-583x(00)00020-3)

- [68] T. Lippert, F. Zimmermann y A. Wokaun, "Surface Analysis of Excimer-Laser-Treated Polyethylene-Terephthalate by Surface-Enhanced Raman Scattering and X-Ray Photoelectron Spectroscopy", *Applied Spectroscopy*, vol. 47, n.º 11, pp. 1931–1942, 1993. Disponible: <https://doi.org/10.1366/0003702934065911>
- [69] K. C. Cole, J. Guèvremont, A. Ajji y M. M. Dumoulin, "Characterization of Surface Orientation in Poly(Ethylene Terephthalate) by Front-Surface Reflection Infrared Spectroscopy", *Applied Spectroscopy*, vol. 48, n.º 12, pp. 1513–1521, 1994. Disponible: <https://doi.org/10.1366/0003702944027877>
- [70] M. Mecozzi y L. Nisini, "The differentiation of biodegradable and non-biodegradable polyethylene terephthalate (PET) samples by FTIR spectroscopy: A potential support for the structural differentiation of PET in environmental analysis", *Infrared Physics & Technology*, vol. 101, pp. 119–126, 2019. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.06.008>
- [71] A. Biswas, S. Lotha, R. Gupta, D. K. Avasthi y S. N. Paul, "Electronic linear energy transfer dependent molecular structural growth in polyethylene terephthalate", *Journal of Applied Physics*, vol. 91, n.º 8, pp. 4922–4927, 2002. Disponible: <https://doi.org/10.1063/1.1462424>
- [72] S. Krimm, "Infrared spectra of high polymers", *Fortschritte der Hochpolymeren-Forschung*, vol. 2, n.º 1, pp. 51–172, 1960. Disponible: <https://doi.org/10.1007/bf02283926>
- [73] K. C. Cole, A. Ajji y É. Pellerin, "New Insights into the Development of Ordered Structure in Poly(ethylene terephthalate). 1. Results from External Reflection Infrared Spectroscopy", *Macromolecules*, vol. 35, n.º 3, pp. 770–784, 2002. Disponible: <https://doi.org/10.1021/ma011492i>
- [74] R. P. Wool, R. S. Bretzlaff, B. Y. Li, C. H. Wang y R. H. Boyd, "Infrared and raman spectroscopy of stressed polyethylene", *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, vol. 24, n.º 5, pp. 1039–1066, 1986. Disponible: <https://doi.org/10.1002/polb.1986.090240508>
- [75] J. K. Brown, N. Sheppard y D. M. Simpson, "The interpretation of the vibrational spectra of the n-paraffins", *Discussions of the Faraday Society*, vol. 9, p. 261, 1950. Disponible: <https://doi.org/10.1039/df9500900261>

[76] J. Arutchelvi, M. Sudhakar, A. Arkatkat y M. Doble, "Biodegradation of polyethylene and polypropylene", *Indian Journal of Biotechnology*, vol. 7, pp. 9–22, 2008.

[77] H. Rajandas, S. Parimannan, K. Sathasivam, M. Ravichandran y L. Su Yin, "A novel FTIR-ATR spectroscopy based technique for the estimation of low-density polyethylene biodegradation", *Polymer Testing*, vol. 31, n.º 8, pp. 1094–1099, 2012. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2012.07.015>

[78] N. Dimitrov, L. Kratofil Krehula, A. Ptiček Siročić y Z. Hrnjak-Murgić, "Analysis of recycled PET bottles products by pyrolysis-gas chromatography", *Polymer Degradation and Stability*, vol. 98, n.º 5, pp. 972–979, 2013. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.02.013>

[79] N. A. El Essawy, S. M. Ali, H. A. Farag, A. H. Konsowa, M. Elnouby y H. A. Hamad, "Green synthesis of graphene from recycled PET bottle wastes for use in the adsorption of dyes in aqueous solution", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 145, pp. 57–68, 2017. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.07.014>

[80] J. Yang, R. Miranda y C. Roy, "Using the DTG curve fitting method to determine the apparent kinetic parameters of thermal decomposition of polymers", *Polymer Degradation and Stability*, vol. 73, n.º 3, pp. 455–461, 2001. Disponible: [https://doi.org/10.1016/s0141-3910\(01\)00129-x](https://doi.org/10.1016/s0141-3910(01)00129-x)

[81] F. A. Aguirre, A. Calafat, N. Sánchez y M. Pérez, "Degradación catalítica de polietileno de baja densidad mediante óxidos de metales de transición", *Catálisis*, vol. 1, pp. 42–47, 2012.

[81] J. Cadena, M. Martínez y L. Guzmán, "Aplicación de secuenciación masiva para el estudio y exploración de diversidad microbiana y su aprovechamiento biotecnológico", *Agro Productividad*, vol. 9, n.º 2, pp. 70–83, 2016.

[83] K. Janczak, K. Hryniewicz, Z. Znajewska y G. Dąbrowska, "Use of rhizosphere microorganisms in the biodegradation of PLA and PET polymers in compost soil", *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 130, pp. 65–75, 2018. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.03.017>

[84] J. Pérez Parrilla, "Biodegradación de tereftalato de polietileno: microorganismos, enzimas y perspectivas futuras", Trabajo de grado, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad de La Laguna, España, 2020. Disponible: <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/20671>

- [85] S. Yoshida et al., "A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate)", *Science*, vol. 351, n.º 6278, pp. 1196–1199, 2016. Disponible: <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>
- [86] G. D. Barone, D. Ferizović, A. Biundo y P. Lindblad, "Hints at the Applicability of Microalgae and Cyanobacteria for the Biodegradation of Plastics", *Sustainability*, vol. 12, n.º 24, p. 10449, 2020. Disponible: <https://doi.org/10.3390/su122410449>
- [87] H. Zhang, R. Dierkes y P. Pérez-García, "Bacteroidetal cold-active and promiscuous esterases play a significant role in global polyethylene terephthalate (PET) degradation", *Europe PMC*, 2021.
- [88] L. Roager y E. C. Sonnenschein, "Bacterial Candidates for Colonization and Degradation of Marine Plastic Debris", *Environmental Science & Technology*, vol. 53, n.º 20, pp. 11636–11643, 2019. Disponible: <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02212>
- [89] P. Sooriyakumar, N. Bolana, M. Kumar y L. Singh, "Biofilm formation and its implications on the properties and fate of microplastics in aquatic environments: A review", *Journal of Hazardous Materials Advances*, vol. 6, n.º 100077, 2022.
- [90] V. Gambarini, O. Pantos, J. M. Kingsbury, L. Weaver, K. M. Handley y G. Lear, "Phylogenetic Distribution of Plastic-Degrading Microorganisms", *mSystems*, vol. 6, n.º 1, 2021. Disponible: <https://doi.org/10.1128/msystems.01112-20>
- [91] H. Arribas Arias, "Microorganismos de la plastisfera y la biodegradación del plástico por la microbiota digestiva de diferentes insectos", Trabajo de grado, Facultad de Biología, Universidad de Salamanca, Salamanca, 2021. Disponible: <https://gredos.usal.es/handle/10366/147486>
- [92] M. J. Gómez Ortiz, "Degradación de polietileno por actinobacterias. Revisión de literatura", Trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2021.
- [93] A. A. Shah, F. Hasan, A. Hameed y S. Ahmed, "Biological degradation of plastics: A comprehensive review", *Biotechnology Advances*, vol. 26, n.º 3, pp. 246–265, 2008. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005>
- [94] H. Rajandas, S. Parimannan, K. Sathasivam, M. Ravichandran y L. Su Yin, "A novel FTIR-ATR spectroscopy based technique for the estimation of low-density polyethylene

biodegradation", *Polymer Testing*, vol. 31, n.º 8, pp. 1094–1099, 2012. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2012.07.015>

[95] S. Kumar Sen y S. Raut, "Microbial degradation of low density polyethylene (LDPE): A review", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 3, n.º 1, pp. 462–473, 2015. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.01.003>



Universidad[®] Católica de Manizales

VIGILADA MINEDUCACIÓN

*Obra de Iglesia
de la Congregación*



Hermanas de la Caridad
Dominicas de La Presentación
de la Santísima Virgen

Universidad Católica de Manizales
Carrera 23 # 60-63 Av. Santander / Manizales - Colombia
PBX (6)8 93 30 50 - www.ucm.edu.co