

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COLONIZACIÓN Y DEGRADACIÓN DE
POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD POR INÓCULO DE *ASPERGILLUS NIGER*
EN HUMUS Y COMPOSTAJE DOMÉSTICO**

**LEIDY ALEJANDRA CALCETERO MORENO
JUAN CAMILO MANCERA HERNÁNDEZ**

**Proyecto Integral de Grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO**

**Director,
DIANA MILENA MORALES FONSECA
M. Sc. Microbióloga**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2021**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

Presidente del jurado

Ing. Angie Tatiana Ortega Ramírez

Ing. Diana Marcela Cuesta Parra

Bogotá D.C., marzo de 2021

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro.

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. María Claudia Aponte González

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretaria General

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Decano de la Facultad de Ingenierías

Ing. Julio César Fuentes Arismendi

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables de los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi mamá por siempre apoyarme en cada una de las travesías emprendidas. A mi prima, por su apoyo y acompañamiento a lo largo de la vida, por la culminación de un trabajo más a su lado. A mi abuelita, porque sé que hubiera querido estar aquí para este momento.

Leidy Alejandra Calcetero Moreno

Gracias a mis padres, jimmy y margoth por apoyarme en estos 5 años a cumplir mis propósitos y a no rendirme. frente a las adversidades que presenta la vida.

Juan Camilo Mancera Hernández

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan agradecimientos especiales a:

La directora del proyecto, Microbióloga Diana Milena Morales Fonseca, por orientarnos, aportarnos su conocimiento y apoyarnos durante el desarrollo de este proyecto.

Al Ingeniero Químico Néstor Ariel Algecira Enciso, por su acompañamiento, tiempo y apoyo en la realización del proyecto.

A la Msc Jenny Alexandra Angarita Baez, por asesorarnos y transmitir su conocimiento para obtener los mejores resultados.

Al personal del laboratorio Chemilab, por su amable atención y ayuda.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVOS	17
1. FUNDAMENTO TEÓRICO	18
1.1 Historia materiales plásticos	18
1.1.1 <i>Polietileno de baja densidad</i>	20
1.2 Degradación	23
1.2.1 <i>Degradación química</i>	24
1.2.2 <i>Degradación mecánica</i>	30
1.3 Normatividad	31
2. CARACTERIZACIÓN DEL POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD CON EL USO DE DATOS BIBLIOGRÁFICOS	33
2.1 Propiedades físicas	36
2.2 Propiedades químicas	38
2.3 Propiedades mecánicas	40
2.4 Propiedades térmicas	42
2.5 Propiedades eléctricas	44
2.6 Propiedades ópticas	45
2.7 Propiedades de procesamiento	48
2.7.1 <i>Inyección</i>	48
2.7.2 <i>Extrusión</i>	49
2.7.3 <i>Soplado</i>	49
2.7.4 <i>Termoformado</i>	49
3. CONDICIONES QUE FAVORECEN EL PROCESO DE BIODEGRADACIÓN DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD	52
3.1 Degradación por radiación	53
3.2 Biodegradación	58
3.2.1 <i>Tipos de biodegradación de LDPE</i>	60
3.3 Medios degradativos	60
3.3.1 <i>Bacterias</i>	60
3.3.2 <i>Hongos filamentosos</i>	61
3.3.3 <i>Medios de cultivo</i>	63

3.4 Sistemas de biodegradación	64
3.4.1 <i>Compostaje</i>	64
3.4.2 <i>Relleno sanitario</i>	67
3.4.3 <i>Biorreactores</i>	70
3.5 Factores recomendados en los procesos de biodegradación del LDPE	74
3.5.1 <i>Nutrientes</i>	74
3.5.2 <i>Temperatura</i>	74
3.5.3 <i>pH</i>	74
3.5.4 <i>Radiación</i>	75
4. VARIABLES DE PROCESO PARA LA BIODEGRADACIÓN DE PELÍCULAS DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD	83
4.1 Diseño de la experimentación	83
4.1.1 <i>Tamaño de la muestra</i>	84
4.1.2 <i>Hipótesis y especificación de variables</i>	84
4.1.3 <i>Características del campo experimental</i>	85
4.2 Caracterización de los materiales y equipos	85
4.3 Descripción de los procesos realizados en el estudio	89
4.3.1 <i>Pretratamiento de polietileno de baja densidad</i>	89
4.3.2 <i>Construcción de los cajones compostadores</i>	90
4.3.3 <i>Inoculación del medio de cultivo</i>	96
4.4 Prueba de peso seco	98
4.5 Prueba de pureza	98
4.6 Porcentaje de degradación y tratamiento de muestras	99
4.7 Análisis y resultados	100
4.7.1 <i>Pureza</i>	100
4.7.2 <i>Peso seco</i>	101
4.7.3 <i>Pretratamiento con radiación UV</i>	102
4.7.4 <i>Hallazgos y comparaciones entre tratamientos</i>	102
4.7.5 <i>Compostaje fresco</i>	103
4.7.6 <i>Compostaje maduro</i>	107
4.7.7 <i>Porcentaje de degradación</i>	111
5. CONCLUSIONES	115
BIBLIOGRAFÍA	117
ANEXOS	

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Polímero natural	19
Figura 2. Plásticos sintéticos o artificiales	19
Figura 3. Ramificación del polietileno de baja densidad	21
Figura 4. Polimerización del etileno a polietileno	22
Figura 5. Degradación oxidativa	26
Figura 6. Efectos de la hidrólisis en el tiempo	28
Figura 7. Transformación de LDPE en aceite y gas	30
Figura 8. Metodología de búsqueda propiedades LDPE	33
Figura 9. Clasificación de termoplásticos	35
Figura 10. Incremento de los grupos carbonilo y vinilo en presencia de oxígeno	41
Figura 11. Relación del calor específico con la temperatura para el polietileno de baja densidad, polietileno de alta densidad y poliestireno	43
Figura 12. Diagrama de transmisión de luz para el plástico	46
Figura 13. Refracción de la luz	47
Figura 14. Metodología de búsqueda condiciones biodegradación	52
Figura 15. Tendencia de investigaciones relacionadas al LDPE	53
Figura 16. Iniciación	54
Figura 17. Propagación	55
Figura 18. Terminación	55
Figura 19. Cambio en el índice de carbonilo para diferentes tipos de PE	56
Figura 20. Efectos de la radiación UV artificial y natural	57
Figura 21. Mecanismo general de biodegradación en plásticos	59
Figura 22. Conidióforos del género <i>Aspergillus</i>	62
Figura 23. Humedad en diferentes modelos de compostaje	65
Figura 24. Crecimiento de <i>Aspergillus niger</i> y <i>Lysinibacillus xylanilyticus</i> en suelo	66
Figura 25. Generación de CO ₂ en el proceso de biodegradación	67
Figura 26. Crecimiento de hongos filamentosos del botadero Cancharani	69
Figura 27. Mineralización de LDPE	71
Figura 28. Cambio del pH del suelo involucrado en biodegradación	75
Figura 29. Distribución de las unidades experimentales de compostaje	83
Figura 30. Pretratamiento del polietileno de baja densidad	90
Figura 31. Consolidado proceso compostaje maduro con humus	92
Figura 32. Consolidado proceso compostaje fresco	93
Figura 33. Construcción del silo compostador	95
Figura 34. Consolidado del procedimiento para la elaboración de los medios de cultivo	96
Figura 35. Consolidado de la activación y preparación del inóculo	97
Figura 36. Evaluación del peso seco recuperado	98
Figura 37. Determinación de pureza en inóculos	99
Figura 38. Determinación porcentaje de degradación	100
Figura 39. Morfología <i>Aspergillus niger</i>	101

Figura 40. Colonización de <i>Aspergillus niger</i>	104
Figura 41. <i>Aspergillus niger</i> en lámina de LDPE irradiada	104
Figura 42. Temperatura promedio del proceso de biodegradación en compostaje fresco por cada montaje.	105
Figura 43. pH del proceso de biodegradación en compostaje fresco por cada montaje	105
Figura 44. Humedad promedio del proceso de biodegradación en compostaje fresco por cada montaje	106
Figura 45. Compostaje maduro con humus	107
Figura 46. Colonización de <i>Aspergillus niger</i> en lámina pretratada con radiación UV	108
Figura 47. Temperatura promedio del proceso de biodegradación en compostaje maduro (humus) por cada montaje	109
Figura 48. pH del proceso de biodegradación en compostaje maduro (humus) por cada montaje	109
Figura 49. Humedad promedio del proceso de biodegradación en compostaje maduro (humus) por cada montaje	110
Figura 50. Porcentaje de degradación de LDPE	114

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Transformación del LDPE en gas, aceite y cera	29
Tabla 2. Compendio de propiedades físicas del LDPE	36
Tabla 3. Absorción de líquidos por polietilenos de densidad 920 y 960 <i>kg/m³</i> a 20 °C después de 30 días de inmersión	39
Tabla 4. Compendio de propiedades mecánicas del LDPE	42
Tabla 5. Compendio de propiedades térmicas del LDPE	44
Tabla 6. Compendio de propiedades eléctricas del LDPE	45
Tabla 7. Compendio de propiedades ópticas del LDPE	48
Tabla 8. Caracterización del LDPE	50
Tabla 9. Hongos asociados al relleno sanitario de Santa Marta, Palangana.	68
Tabla 10. Efectos de <i>Aspergillus niger</i> y <i>Aspergillus flavus</i> en el peso molecular	70
Tabla 11. Modelos cinéticos involucrados en el proceso de compostaje	72
Tabla 12. Métodos isoconversionales	73
Tabla 13. Tipos de degradación	76
Tabla 14. Sistemas de degradación	79
Tabla 15. Materiales y equipos	86
Tabla 16. Determinación del peso seco	101
Tabla 17. Compendio de investigaciones relacionadas al compostaje	102
Tabla 18. Resultados del proceso de biodegradación de LDPE	112
Tabla 19. Peso de las láminas de LDPE luego de radiación UV	112
Tabla 20. Análisis de varianza (ANOVA)	113

LISTA DE ABREVIATURAS

atm	Atmósfera
ASTM	Sociedad americana para pruebas y materiales
Al₂O₃	Alúmina
°C	Celsius
cc	Centímetro cúbico
cm	Centímetro
CoSO₄	Sulfato de cobalto (II)
CO₂	Dióxido de carbono
DPM	Distribución del peso molecular
Da	Dalton
dB	Decibeles
d2w	Aditivo oxodegradable
ESC	Agrietamiento por estrés ambiental
FTIR	Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier
FCC	Catalizador gastado de craqueo catalítico
FeSO₄	Sulfato de hierro (II)
g	Gramo
GPa	Gigapascal
HDPE	Polietileno de alta densidad
H₂O	Agua
HZSM-5	Catalizador de molibdeno soportado en una zeolita
ICPs	Polímeros intrínsecamente electro-conductores
ICO	Índice de carbonilo
J	Julios
Kg	Kilogramo
KN	Kilonewton
KV	Kilovoltio
K₂HPO₄	Fosfato dipotásico
LDPE	Polietileno de baja densidad
LDPE-P	Polietileno de baja densidad impreso
LDPE-OXO-P	Polietileno de baja densidad impreso con aditivo oxodegradable
LLDPE	Polietileno de baja densidad linear
LLDPE-ig-A	Polietileno de baja densidad injertado con ácido itacónico
MFI	Índice de fluidez
MgSO₄	Sulfato de magnesio
mm	Milímetro
mL	Mililitro
MMD	Distribución de masa molar
MPa	Megapascal
(NH₄)₂SO₄	Sulfato de amonio

NaNO₃	Nitrato de sodio
nm	Nanómetro
Pa	Pascal
PE	Polietileno
PEBD	Polietileno de baja densidad
PE-OXO	Polietileno oxodegradable
PE-BIO	Polietileno biooxodegradable
Psi	Libra por pulgada cuadrada
PDA	Agar papa dextrosa
PLA	Ácido poliláctico
POF	Fibra óptica de polímero
PM	Peso molecular
RPM	Revoluciones por minuto
RSO	Residuos sólidos orgánicos
S	Suelo
SMP	Suelo + microorganismo + LDPE no irradiado con UV
SMPU	Suelo + microorganismo + LDPE irradiado con UV
SP	Suelo + polietileno no irradiado con UV
SUP	Suelo + polietileno irradiado con UV
SEM	Microscopía electrónica de barrido
T_m	Temperatura de fusión
T_g	Temperatura de transición vítrea
URL94	Norma de inflamabilidad
UV	Ultravioleta
UV-A	Ultravioleta de longitud de onda larga
UV-B	Ultravioleta de longitud de onda media
UV-C	Ultravioleta de longitud de onda corta

RESUMEN

La investigación se centró en la evaluación de la colonización y degradación de polietileno de baja densidad mediante la interacción con el inóculo *Aspergillus niger* en el sistema de compostaje. Inicialmente se realizó una búsqueda bibliográfica exhaustiva para caracterizar el LDPE según sus propiedades físicas, químicas, mecánicas, térmicas, eléctricas, y ópticas. Asimismo, se ejecutó una búsqueda sobre los sistemas de degradación y biodegradación del polímero, y las condiciones óptimas para que el proceso de biodegradación sea eficiente. Finalmente, se presentan los resultados del proceso experimental desarrollado durante 1 mes, en cajones compostadores con humus (compostaje maduro) y compostaje fresco en ausencia y presencia de radiación UV. Para los dos tipos de compostaje se evidenció biodegradación del LDPE, sin embargo, se destaca el resultado obtenido por el compostaje fresco en presencia de radiación UV que alcanzó un porcentaje de degradación de 4,8421%, por lo tanto, se determina que es factible biodegradar LDPE en el sistema de compostaje con inóculo de *Aspergillus niger*.

Palabras clave: Biodegradación, *Aspergillus niger*, compostaje aerobio, polietileno de baja densidad (LDPE), humus, radiación UV.

INTRODUCCIÓN

El entorno ecológico y su destrucción ha suscitado una creciente preocupación mundial, encontrando el uso excesivo del plástico y sus desechos como una de las principales fuentes de contaminación. Actualmente, “se desechan aproximadamente ciento cincuenta millones de toneladas de plásticos en los territorios marinos y se calcula que aproximadamente mil doscientas especies marinas son afectadas diariamente, confundiendo el plástico con su alimento natural” [1]. Otro de los ecosistemas afectados por los desechos plásticos en el contexto colombiano, son los manglares, dado que son el hogar de diversidad de especies. Una de las consecuencias del uso de polímeros en el país es la pérdida de cien mil hectáreas de manglares, afectando notoriamente el equilibrio del ambiente [2].

El aprovechamiento y beneficio del polietileno de baja densidad (LDPE) lo ha ubicado como el polímero más producido a nivel nacional, equivalente al 27,5% de la producción en el país. También, es necesario mencionar que la producción de desechos relacionados con el polietileno en Bogotá, se encuentra alrededor de 428 toneladas al año [3]. Debido a su alta durabilidad, éstos tardan entre cien y mil años para degradarse, tampoco cuentan con la característica de biodegradabilidad, por lo cual, los plásticos (polímeros) son eliminados a través de diversos medios como la incineración, los vertederos o rellenos sanitarios, incluso son aprovechados a través mecanismos como el reciclaje.

En ese sentido, resulta relevante centrar la atención en este tipo de residuos sólidos, buscando la conservación de las fuentes de materias primas y protección del medio ambiente con prácticas que aporten soluciones a esta problemática que afecta la vida de los seres vivos y del mundo natural en general. La indagación e identificación de las características claves que poseen los microorganismos para aportar soluciones biotecnológicas, permite proponer como alternativa la biodegradación; técnica que posibilita la eliminación segura de estos materiales, dado que se pone en contacto un polímero determinado con enzimas (presentes en los microorganismos) que catalizan su respectiva degradación [4]. Con el paso del tiempo, “el microorganismo toma al material como una fuente de carbono necesaria para su crecimiento y de obtención de energía para sus funciones metabólicas” [5].

En la presente investigación se evalúa el proceso de colonización y degradación de LDPE por medio de un compostaje maduro con humus y un compostaje fresco, bajo la acción de un inóculo de *Aspergillus niger*, en un periodo de tiempo de 30 días. Abordando la caracterización del LDPE, las condiciones que favorecen su biodegradación y la valoración cualitativa de los cambios macroestructurales evidenciados en el material tras concluir la experimentación.

Para efectos de la investigación, este documento ha sido estructurado en cinco capítulos, en los cuales se abordó la descomposición de polímeros, por medio de *Aspergillus niger*. Para ello fue necesario realizar una caracterización del material, en donde se hace una descripción detallada de las propiedades físicas, químicas, ópticas, térmicas y de procesamiento del polímero.

Posteriormente se evalúan las condiciones que intervienen en el proceso de biodegradación del polímero, incluyendo algunas variables como el pH, temperatura, y humedad, a través de un proceso experimental en donde se llevaron a cabo pretratamientos con irradiación UV, la elaboración de los cajones de compostaje fresco y maduro, y la inoculación del microorganismo *Aspergillus niger*.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el proceso de colonización y degradación de polietileno de baja densidad en un cultivo individual de *Aspergillus niger*.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el polietileno de baja densidad con el uso de datos bibliográficos.
- Determinar las condiciones que favorecen el proceso de biodegradación de polietileno de baja densidad, partiendo de revisiones bibliográficas.
- Evaluar las variables de proceso (radiación UV, compostaje y humus) para la biodegradación de películas de polietileno de baja densidad.

1. FUNDAMENTO TEÓRICO

Los materiales plásticos y los procesos de obtención del polietileno de baja densidad tienen una historia reciente y conocida, y en la actualidad se abordan diferentes tipos de degradación de polietileno de baja densidad incluyendo la degradación química y mecánica, con el fin de dar un alivio a sus efectos adversos en el ambiente.

1.1 Historia materiales plásticos

La creación de los polímeros durante los siglos XX y XXI tuvo un impacto significativo en la humanidad. Dos de sus principales derivados (cauchos y plásticos), contribuyeron al desarrollo de diversos productos que incidieron en las actividades humanas cotidianas que hacen parte de la vida moderna [6]

La industria del plástico tuvo un crecimiento importante en la década de los '30 en el siglo XX. Cabe mencionar que existían materiales con propiedades plásticas desde la antigüedad [6]. “Los primeros materiales con las propiedades atribuidas hoy en día a los plásticos, fueron los cuernos (asta natural), las pezuñas animales e incluso conchas de tortuga; usados para fabricar artículos de moda o accesorios como peines y botones” [7].

Antes de la aparición del primer plástico sintético, se da el empleo de **polímeros naturales** (obtenidos directamente de materias primas vegetales o animales [9], véase la Figura 1) como el betún, la goma, el ámbar, la celulosa, el celofán y la gutapercha, o la goma laca y la caseína, una de las principales proteínas de la leche de vaca. Materiales con los que el hombre podía fabricar productos útiles y lograr aplicaciones diversas que incluyen desde artículos rituales [10], torneado indio (recubrimiento de objetos con goma laca), hasta la impregnación de los muertos para su momificación con asfalto sirio o betún de Judea. Se tienen referencias de que éstos se utilizaban en Egipto, Babilonia, India, Grecia y China [10].

Figura 1.

Polímero natural



Nota. El caucho natural se obtiene de una sustancia vegetal, el látex. Tomado de: S. Sánchez et al., *Tecnologías II ESO*, Oxford University Press España, 2010.

Figura 2.

Plásticos sintéticos o artificiales



Nota. La imagen representa la carcasa de teléfono realizada en Baquelita negra: primer polímero completamente sintético. Tomado de: "Referencias Históricas Y Evolución De Los Plásticos".
<http://www.ehu.eus/reviberpol/pdf/ENE09/garcia.pdf>.

Debido a su difícil recolección y purificación, el primer paso en la búsqueda de **polímeros sintéticos** son aquellos derivados del petróleo, el gas natural o el carbón [9]. Los materiales naturales son modificados con tratamientos químicos, creando diversas texturas y durezas, como el caucho vulcanizado de Charles Goodyear, quien descubrió que combinar azufre en polvo con caucho natural, mejoraba enormemente sus características [2]. Un claro ejemplo de estos polímeros se muestra en la Figura 2.

La historia del polietileno se remonta hacia finales del siglo XIX, en donde se obtienen diversos polímeros. El polietileno de baja densidad se obtuvo de manera accidental por estudios de presión, provenientes de una mezcla entre etileno y benzaldehído [11]. Desde 1900 se han ideado otros métodos para producir "*polimetileno*", incluido el uso de "catalizadores de boro trifluoruro de éter etílico a 0°C y otro método de condensación en el que se hacía reaccionar dibromuro de decametileno con sodio en una reacción tipo Wurtz" [6].

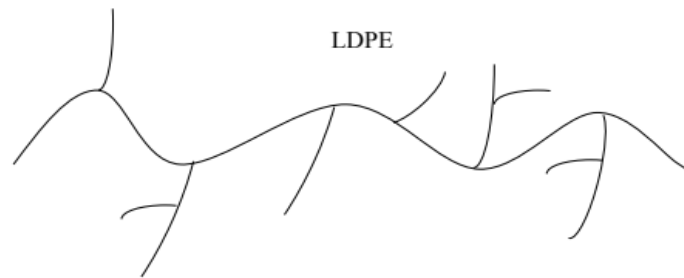
Hasta 1950, el polietileno comercial fue producido a través de procesos de alta presión, que originan materiales ramificados y de masa molar promedio moderada inferior de 50 kg/mol [6], polímero conocido hoy en día como polietileno de baja densidad (LDPE). "El polietileno constituye más de un tercio de la cuota de mercado mundial de termoplásticos básicos, con una producción en 2012 de más de 70 millones de toneladas, que consistía en un 45% de HDPE, un 30% de LLDPE y un 25% de LDPE" [6].

1.1.1 Polietileno de baja densidad

El polietileno de baja densidad (LDPE) es un polímero derivado del petróleo [13], hidrocarburo alifático de cadena larga del tipo $-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-$ [6], perteneciente a la familia de olefínicos, conformado por monómeros de etileno [13], y de cadena ramificada (como se ilustra en la Figura 3) que previene el acercamiento de moléculas de polímero y da como resultado una disminución de la cristalinidad [14].

Figura 3.

Ramificación del polietileno de baja densidad



Nota. La figura representa la alta frecuencia de ramificación del LDPE, con más átomos de carbono terciarios en su estructura. Tomado de: S. K. Kumar, Biodegradation of low-density polyethylene by fungi, tesis doc. Faculty of Science, Engineering and Technology, Swinburne University of Technology, Melbourne, Australia, 2015.

Se obtiene por polimerización del etileno (también denominado eteno) a altas presiones por el mecanismo de radicales libres [11]. “Técnica que consiste en romper los enlaces π de este alqueno, ya que éstos son más débiles que los enlaces σ , a fin de dotar de electrones libres a sus extremos y permitir la unión entre monómeros” [15].

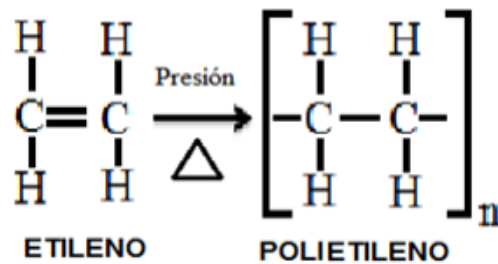
Principalmente se sintetiza a partir de fuentes de petróleo como nafta, etano, propano y butano, sin embargo, en 1940 el etileno para la polimerización se obtenía de melaza, cuyo etanol era deshidratado para producir etileno [6]. Existen diversas rutas para la preparación de polímeros de etileno, dentro de las que se encuentran los procesos de alta presión, proceso Ziegler, proceso Phillips, proceso Standard Oil y procesos de metaloceno.

En el proceso de polimerización a altas presiones se pueden presentar reacciones exotérmicas rápidas, ya que los polímeros producidos a alta presión de etileno “se fabrican comercialmente a presiones entre 1000 y 3000 atm (15,000 - 45,000 psi), y temperaturas tan altas como 250 °C” [15]. Se hace necesario eliminar impurezas como el hidrógeno y acetileno tras actuar como agentes de cadena de transferencia.

“Además de oxígeno y peróxidos (benzoílo, dietilo), se han utilizado como iniciadores los hidroperóxidos y los compuestos azoicos. El benceno o clorobenceno puede ser empleado como solvente” [15], y para disipar el calor de reacción se puede hacer uso de agua y otros líquidos. Siendo preferibles los sistemas de polimerización continua y equilibrada.

Figura 4.

Polimerización del etileno a polietileno



Nota. El polietileno polimerizado a alta presión se denomina polietileno de baja densidad (PEBD), para distinguirlo del material esencialmente lineal. Su proceso involucra la etapa de iniciación, propagación y terminación. Tomado de: *Bioprospección de la degradación del polietileno*.

<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/11849/MartinClavijoKarenFernanda2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Debido a sus excelentes propiedades eléctricas, el polietileno se usó como aislante en los cables submarinos hasta 1945. Recientemente, han adquirido mayor importancia los usos que se basan en su inercia y su resistencia al agua” [16]. “La aplicación más popular de LDPE es la lámina, de la cual se elaboran bolsas de transporte, material de empaque y plástico agrícola” [14].

Se estima que 500 mil millones de toneladas de LDPE se producen anualmente en forma de bolsas de plástico [14]. Otros de sus usos engloban la manufactura de botellas y otros envases, tuberías, película para envolver, fibras, películas, utensilios

caseros, aparatos quirúrgicos, juguetes, artículos de fantasía [16], contenedores y material de construcción [12].

Dentro de los usos menos comunes del polietileno de baja densidad cabe mencionar la modificación de asfalto para mejorar su resistencia. El LDPE reciclado es un buen modificador de las propiedades mecánicas del material asfáltico, pues “permite que los pavimentos flexibles soporten temperaturas altas; disminuye las emisiones de gases invernaderos a la atmósfera, junto con la temperatura de fabricación y colocación” [17]. A su vez, se ha estudiado la obtención de materiales poliméricos semiconductores a partir del polietileno de baja densidad (un material aislante), donde “al dopar polímeros que contienen enlaces dobles conjugados, se incrementa su conductividad eléctrica hasta niveles similares a la de algunos metales, transformándose de esta manera en polímeros intrínsecamente electro-conductores (ICPs por sus siglas en inglés)” [18].

1.2 Degradación

La degradación consiste en cambios fisicoquímicos o biológicos caracterizados por señales de envejecimiento y deterioro, generados por “condiciones ambientales como: humedad, calor, actividad biológica o condiciones químicas suaves. Algunos de los procesos que se llevan a cabo son la fotodegradación, oxi-degradación, degradación térmica, y la biodegradación” [19]. Los efectos de la degradación se reflejan en los cambios de las características mecánicas, ópticas y eléctricas del polímero, así como la aparición de grietas rajaduras, erosión, decoloración.

Físicamente, una de las características más apreciables del plástico degradado es la disminución de la resistencia original del material, cuantificada con las propiedades mecánicas, el material es más quebradizo, menos flexible, su textura es más áspera y el color cambia a un tono más opaco. Por otro lado, desde un punto de vista químico, la principal señal de degradación en un plástico es la disminución de su masa molecular [20].

1.2.1 Degradación química

La vía química es aquella que “incluye la erosión por viento y la lluvia, la oxidación, la fotodegradación, la degradación con ácidos bases o agua y la degradación térmica” [21]. Se hace uso de aditivos de hierro, cobalto o níquel, para acelerar el proceso de oxidación en el plástico [20] presentando alteraciones al contacto con medios agresivos [21].

El d2w®, es un aditivo agregado al polietileno, poliestireno, polipropileno, entre otros polímeros, al momento de su fabricación. Acelera el proceso de oxidación en la estructura molecular de los materiales plásticos, a fin de que éstos se descompongan entre 3 y 5 años (este proceso normalmente puede tomar más de 100 años). La concentración de este aditivo puede variar dependiendo de la vida útil del producto al cual se aplica [20].

1.2.1.i. Termodegradación. Es el proceso por el cual se aplican elevadas temperaturas a un polímero, generando cambios químicos y/o físicos en su estructura [22]. Al elevar la temperatura se presenta separación de las cadenas del polímero, y con ello, la división de enlaces covalentes o de los grupos laterales [23]. Se produce una disminución de peso molecular del polímero que disminuye perceptiblemente sus cualidades físicas y químicas [21].

Durante la degradación térmica ocurren tres procesos simultáneos: la ruptura de los enlaces covalentes o de los grupos funcionales en las cadenas moleculares del polímero [22], generando cadenas más cortas; la cisura de los bordes de la cadena, obteniéndose el monómero de partida, y la abstracción de grupos funcionales [21].

La termodegradación depende fundamentalmente de la magnitud de la energía de los enlaces presentes en la molécula [23] y el rompimiento o no de enlaces, está directamente relacionado con la reactividad de los radicales presentes en el polímero [22]. Algunos polímeros experimentan reacciones químicas que producen especies gaseosas evidenciadas por la pérdida de peso del material [21]. Normalmente, la degradación se genera junto con la oxidativa si confluye con ellas el oxígeno [22].

Para que un material se degrade debe absorber una cantidad de energía superior a la energía de disociación de los enlaces, lo cual ocurre a temperaturas superiores a 400-600 °C [23]. “La termodegradación ocasiona cambios en la temperatura de transición vítrea (Tg), peso molecular e índice de fluidez del polímero; así, cuando un polímero se degrada por ruptura de la cadena principal, su peso molecular y viscosidad se reducen y el índice de fluidez aumenta” [22].

Existen dos mecanismos de degradación de cadenas poliméricas que están relacionados con la temperatura. El primero es la eliminación de los grupos laterales, formando grupos de bajo peso molecular que se volatilizan a la temperatura de degradación. El segundo consiste en la despolimerización con la consecuente reducción del peso molecular. Este mecanismo predomina en altas temperaturas [22].

1.2.1.ii. Oxidación. La oxidación es la degradación más común en los polímeros, “normalmente se logra mediante la formación oxidativa de grupos funcionales en su matriz polimérica, este resultado se obtiene principalmente por fotooxidación con radiación ultravioleta: sin embargo, el LDPE puede deteriorarse por fotooxidación en la intemperie a condiciones naturales” [14].

La reacción de la oxidación ocurre en presencia del oxígeno, en donde el polímero está expuesto a factores externos como: luz ultravioleta artificial o natural, radiación gamma, acción de la electricidad y calor, obteniendo como resultado una degradación del polímero [24]. En la Figura 5 se evidencia que los efectos de la oxidación, presentándose radicales libres que reaccionan con el oxígeno, atacando los enlaces covalentes del esqueleto del mismo. “En la mayoría de los casos, la velocidad del mecanismo de degradación se acelerará con el tiempo a medida que la reacción se autocataliza, las cadenas del polímero se escinden, y las cadenas acortadas resultantes terminan con grupos funcionales oxigenados, incluidos ácidos carboxílicos, ésteres, cetonas y aldehídos” [25].

Figura 5.

Degradación oxidativa



Nota. Efectos de la oxidación. Tomado de: “*Global Resin Trends 2015: An Expert Roundtable*”. <http://read.nxtbook.com/wiley/plastics/engineering/january2015/consultantscorner.html>

La oxidación puede suceder en temperaturas menores a 50°C, y la incidencia con luz ultravioleta ocurriría en temperatura ambiente, reduciendo la viscosidad de la masa. Se puede presentar una mayor oxidación al denotar decoloración y rayado [6]. A. Vázquez *et. al*, investigaron los efectos de la oxidación en el LDPE, en donde se involucraron 4 tipos de películas; polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno de baja densidad impreso (LDPE-P), polietileno de baja densidad con aditivo oxodegradable (OXO-LDPE), y polietileno de baja densidad impreso con aditivo oxodegradable (LDPE-OXO-P). El aditivo involucrado, d2w no genera reacciones ajenas, sólo acelera el proceso de biodegradación. Las películas se oxidaron en un horno forzado a 70°C por 39 días, al finalizar este proceso los polímeros con aditivo reflejaron una pérdida de masa igual a 8358 Da, y el LDPE virgen no presentó diferencia significativa [26], [27]. Posteriormente, las películas de LDPE fueron sometidas al proceso de bioreactores, el cual se explicará en el capítulo 3 denominado: “Condiciones que favorecen el proceso de biodegradación de polietileno de baja densidad”.

1.2.1.iii. Hidrólisis. Consiste en la división de una molécula principal en dos de menor energía, donde la molécula de H₂O se fragmenta y se incorpora en la cadena principal, rompiendo los enlaces covalentes. Los factores que influyen en la degradación por hidrólisis en los polímeros son [28]:

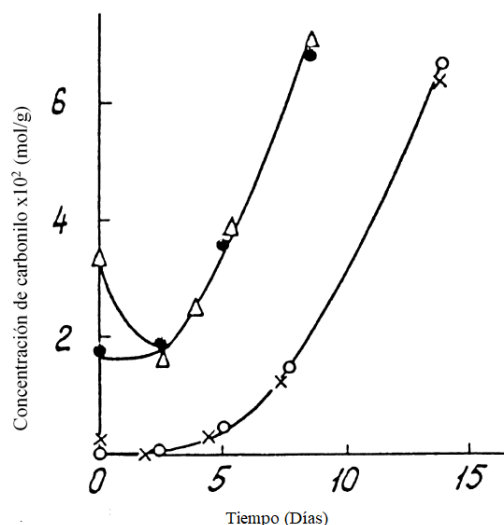
- Naturaleza de los grupos funcionales
- Grado de afinidad del agua (hidrofílicos-hidrofóbicos)
- Temperatura de transición vítrea (T_g)
- Peso molecular
- Estructura química

Teniendo en cuenta lo anterior, otras propiedades pueden afectar la hidrólisis, como la presencia de un enlace químicamente susceptible protegido por una estructura hidrofóbica o por regiones cristalinas, provocando que el proceso sea más lento [29]. De lo contrario, si aparecen grupos carbonilos con doble enlace con el oxígeno como los ésteres, amidas, carbonatos y uretanos, serán más susceptibles a la degradación en medio acuoso [30].

En el LDPE, el agua absorbida actúa como plastificante reduciendo la T_g, a su vez reduce la rigidez, la resistividad dieléctrica y aumenta la resistencia al impacto [30]. En la Figura 6, se evidencia que la tasa de oxidación (medida en mol/g) del LDPE virgen es menor que la de los LDPE injertados. El LDPE-g-IA extraído con acetona y con etanol presentó una leve influencia en la tasa de oxidación [31].

Figura 6.

Efectos de la hidrólisis en el tiempo



Nota. La tasa de oxidación en agua del LDPE virgen (O), LDPE extraído con acetona (X), LDPE-g-IA extraído con acetona (Δ), LDPE-g-IA extraído con etanol (\cdot), el espesor del material fue de 40 μm a una temperatura de 96°C. Tomado de: "Oxidation of LDPE and LDPE grafted with itaconic acid, in contact with water,". [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(99\)00267-0](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(99)00267-0)

1.2.1.iii. Pirólisis. "La pirólisis es una técnica de reciclaje terciaria en la que los polímeros orgánicos se convierten en aceite líquido, carbono y gases a altas temperaturas a través de la descomposición térmica" [32], se lleva a cabo en un rango de temperaturas de (300-900) °C y se ve afectado por los siguientes factores [33]:

- **Temperatura:** A una temperatura más alta se producen mezclas de olores dulces, la cadena de carbonos se extenderá a medida que se disminuye la temperatura, también afecta la calidad de los productos. Las altas temperaturas generan grupos aromáticos y reacciones secundarias indeseadas [34].
- **Implementación de un catalizador:** La intervención de un catalizador permite la producción a menor tiempo y temperatura.

Considerando los anteriores factores, la pirólisis puede ocurrir de dos maneras:

Pirólisis Térmica

En este proceso, el polímero se expone a altas temperaturas generando una transformación del PE en cera, aceite y gas [35]. Los investigadores P.T Williams y E. A Williams involucraron LDPE en un reactor de lecho fluidizado a temperaturas de 500, 550, 600, 650 y 700 °C; sus resultados se evidencian en la Tabla 1.

Tabla 1.

Transformación del LDPE en gas, aceite y cera

Producto	Temperatura °C				
	500	550	600	650	700
Gas	10,8	21,4	24,2	40,1	71,4
Aceite	43,9	43,2	51,0	47,8	24,6
Cera	45,3	35,4	24,8	12,1	4,0
Aceite + Cera	89,2	78,6	75,8	59,9	28,6

Nota. En esta tabla se evidencia el rendimiento de producto de la pirólisis en lecho fluidizado de LDPE en relación con la temperatura Tomado de: “*Fluidised bed pyrolysis of low density polyethylene to produce petrochemical feedstock*”. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(99\)00011-X](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(99)00011-X)

En el proceso por debajo de los 600 °C, se produce una cera que tiende a ser más viscosa y de color crema, sin embargo, al elevarse la temperatura, la viscosidad disminuye hasta conformar un aceite de color amarillo, el aceite producido es de baja calidad, debido a su bajo índice de octanaje y a la presencia de azufre, nitrógeno y fósforo [33], [35], y el gas obtenido a diferentes temperaturas está constituido en mayor proporción por etano y propano a una temperatura de 700 °C

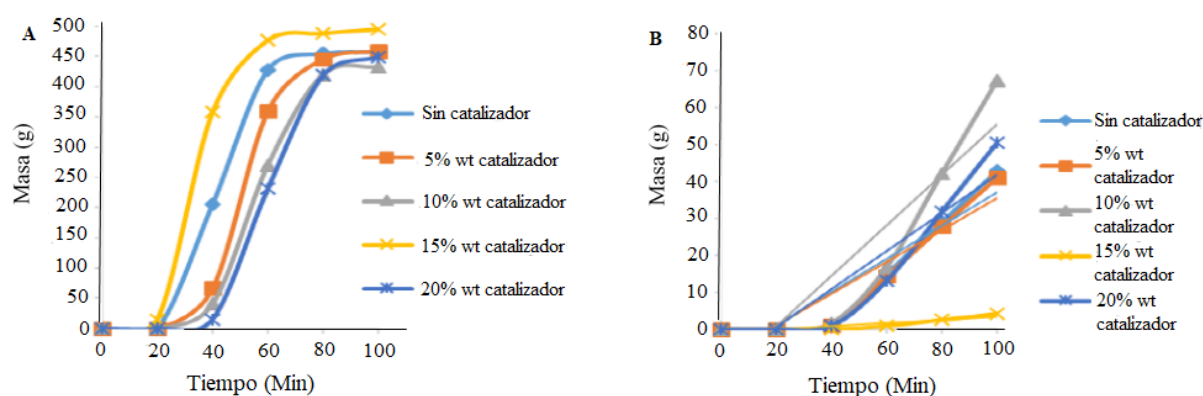
Pirólisis Catalítica

La implementación de un catalizador que puede ser: FCC, HZSM-5, Al₂O₃, Caolin, reduce la demanda energética y los tiempos de degradación del polímero, permitiendo una alta conversión de los desechos plásticos en aceite líquido [32], [36].

En el proceso de pirólisis catalítica del LDPE, se involucra el catalizador de caolín en diferentes variaciones de peso, en la Figura 7 se presenta la producción de aceite y gas.

Figura 7.

Transformación de LDPE en aceite y gas



Nota. La cantidad de aceite y gas producido cada 20 min en la pirólisis catalítica a diferentes cantidades de caolín: 5, 10, 15 y 20% p/p. Tomado de: “Kinetic study on the pyrolysis of low-density polyethylene (LDPE) waste using kaolin as catalyst,”.Doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/778/1/012071>

En la Figura 7A se evidencia que con un 15% p/p de catalizador, se genera una cantidad significativa de aceite a una temperatura de 450°C; en la Figura 7B con un 10% p/p de catalizador la concentración de gas es mayor [36].

1.2.2 Degradación mecánica

La degradación mecánica está relacionada con los efectos macroscópicos que llevan a la fractura, y la deformación producida por las fuerzas mecánicas efectuadas sobre el polímero [37]. Dicho proceso es evidente cuando el polímero está bajo tensión mecánica junto a fuertes irradiaciones ultrasónicas. Por lo tanto, se presentará la ruptura de las cadenas moleculares bajo cizallamiento, disminuyendo el ancho de la

función de distribución del peso molecular y cambiando la concentración de dobles enlaces [38].

1.3 Normatividad

Se cuenta con diversos métodos para evaluar la biodegradabilidad de los materiales plásticos, por lo tanto, se especifican aquellas normas que controlan y clasifican las tasas de degradación de los plásticos; además de evaluar el grado de pérdida de sus propiedades físicas, ocasionado por el proceso de biodegradación en compostajes con presencia de microorganismos.

ASTM D 6954-04

Los entornos de eliminación varían con la exposición en el suelo y los vertederos. Los procesos de fotooxidación deben ser ejecutados en un rango de temperatura razonable para no incurrir en cambios de fase. Por medio de esta guía se busca reducir el impacto ambiental de los polímeros que no requieren más de 24 meses para oxidarse y biodegradarse. Mediante el nivel 1 de la norma se puede medir la pérdida de propiedades y peso molecular después de la exposición del polímero a radiación UV.

ASTM D5988-03

Se determina la tasa de biodegradación aerobia en los plásticos sintéticos sin o con algún aditivo en mezcla de suelo, contacto con el suelo y compost maduro. Esta norma aplica para aquellos plásticos que no inhiben las bacterias y hongos presentes en el suelo o compost.

ASTM D5338-15

Por medio de esta norma se determina la conversión de la muestra de plástico a dióxido de carbono en el proceso de compostaje, en donde se alcancen temperaturas termofílicas. En el porcentaje de biodegradación obtenido se excluye la cantidad de carbono transformado en biomasa. Presenta rutas para comparar y clasificar las tasas controladas de laboratorio y el grado de pérdida de propiedades físicas de los polímeros por procesos térmicos.

En síntesis, se ha expuesto la evolución de los materiales plásticos, en especial del polietileno de baja densidad, junto con sus aplicaciones y métodos de degradación. Uno de los factores que influye en el crecimiento e incidencia de la industria del plástico, es la alta demanda de materiales para suplir las necesidades de las personas en su cotidianidad, lo cual ha permitido la diversificación y el incremento del mercado de los polímeros.

Otro de los factores que intervienen en la producción y consumo de plásticos a nivel mundial es la evolución de las técnicas de su elaboración, dado que las mejoras en las variables de procesamiento y la aparición de nuevos métodos, optimiza los procedimientos de fabricación, haciéndose necesarias actividades que reduzcan y controlen las elevadas cantidades de polietileno, con el fin de reducir la contaminación. Es por esto que se cuenta con distintos métodos químicos y fisicoquímicos como la degradación química y mecánica, que involucran tratamientos térmicos, oxidativos, de reciclaje, entre otros.

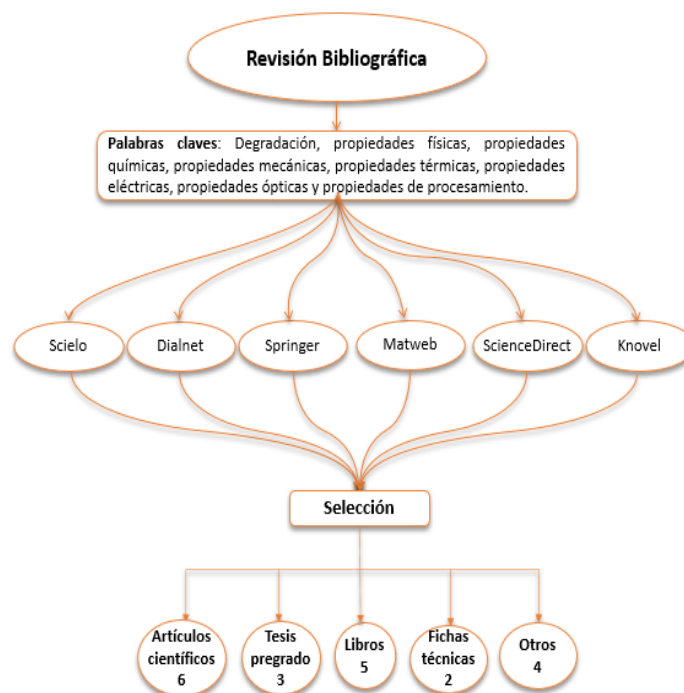
2. CARACTERIZACIÓN DEL POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD CON EL USO DE DATOS BIBLIOGRÁFICOS

En el presente capítulo, se realiza una detallada revisión bibliográfica de una serie de investigaciones que abordan las características del polietileno de baja densidad, mediante pruebas que incluyen la espectroscopia de transmisión de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR), microscopía electrónica de barrido (SEM), análisis termogravimétrico y cromatografía de permeación en gel; describiendo de forma puntual las diversas propiedades del material, y las variables que atañen su transformación. En la Tabla 8 se identifican las principales propiedades.

El análisis y selección de la información consultada, se desarrolló a partir de una metodología de búsqueda como la que se ilustra en la Figura 8, con bases de datos y motores de búsqueda tales como ScienceDirect, Dialnet, Scielo, Knovel y Matweb. Mediante el empleo de palabras claves como degradación, propiedades físicas, químicas, mecánicas, térmicas, eléctricas, ópticas y de procesamiento; para finalmente contar con 20 documentos entre los que se encuentran tesis de pregrado, artículos científicos, libros, entre otros.

Figura 8.

Metodología de búsqueda propiedades LDPE



Nota. Revisión bibliográfica empleada para caracterizar el LDPE

El polietileno de baja densidad puede ser clasificado con base en parámetros que incluyen la densidad, contenido de monómeros, peso molecular, distribución del peso molecular, índice de fluidez y modificación, de los cuales, la clasificación más empleada es la densidad, al ser un buen indicativo de las cualidades entre los polietilenos, donde en general, con densidades altas, mayores propiedades mecánicas [11].

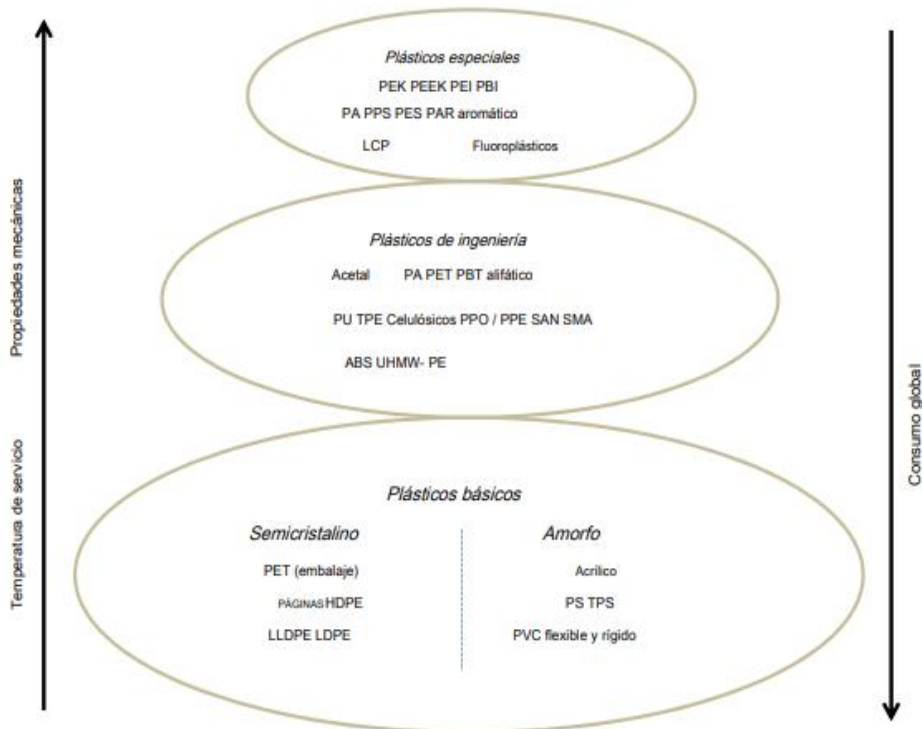
Las propiedades dependen fundamentalmente de su estructura, dado que el arreglo molecular determina la estructura del polímero, así como el grado de ramificación [11], e influye en su proceso de fusión, solidificación, determinando las propiedades físicas y mecánicas [37]. Los polímeros de etileno por contenido de monómeros se pueden clasificar como “*homopolímeros*, aquellos en los que todos los monómeros que los constituyen son iguales, o *copolímeros*; polímeros formados por dos o más monómeros diferentes” [38]. Siendo el LDPE un homopolímero ramificado que tiene por unidad monomérica el etileno.

De acuerdo a las propiedades físicas y mecánicas, los polímeros se clasifican en 3 grandes grupos: “termopolímeros (se moldean al calentarse), termorrígidos (materiales entrecruzados duros, no maleables y no flexibles) y elastómeros (material entrecruzado flexible y extendible)” [39]. Al estar constituido por cadenas unidas entre sí débilmente, el polietileno de baja densidad se clasifica como un termoplástico que es fácilmente conformable mediante calentamiento y presión, lo que permite moldearlo y darle nuevas formas que conserva al enfriarse [9], [37].

Dada la variedad de termoplásticos, estos a su vez se clasifican en 3 grupos (plásticos especiales, plásticos de ingeniería y plásticos básicos) como se ilustra en la Figura 9, donde el LDPE pertenece a los plásticos básicos semicristalinos con alto consumo de volumen, costo bajo, temperaturas de transición relativamente bajas; de modo que su temperatura de servicio está alrededor de la temperatura ambiente con amplias aplicaciones. Cabe señalar, que el consumo global de este grupo de plásticos, es de alrededor de 600 veces el del grupo de plásticos especiales [6].

Figura 9.

Clasificación de termoplásticos



Nota. El grupo de plásticos básicos del cual forma parte el LDPE, se divide en plásticos semicristalinos y amorfos porque sus propiedades se rigen por su cristalinidad y temperaturas de transición. Tomado de: *Brydson 's Plastics Materials*. Disponible en:

https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpBPME0001/viewerType:toc//root_slug:brydsons-plastics-materials/url_slug:relation-structure-electrical?issue_id=kpBPME0001

Actualmente existen diversas referencias de PE disponibles, la mayoría de las cuales difieren en sus propiedades de una forma u otra. Estas diferencias se deben a las siguientes variables [6]:

- El grado de ramificación de cadena corta en el polímero.
- Grado de ramificación de cadena larga.
- Masa molar media.
- MMD (puede depender en parte de la ramificación de cadena larga).
- Residuos de comonomero.
- Impurezas o residuos de polimerización, que incluso pueden combinarse con el polímero.

2.1 Propiedades físicas

El polietileno de baja densidad presenta un grado de cristalinidad medio, es un material opaco o transparente dependiendo del espesor. Su grosor puede variar entre 12,7 - 300 micrones y el contenido de acetato de vinilo se agrupa en un rango de 2,50 - 6,60% [41]. Su baja densidad de (0.910-0.925) g/cm^3 , le permite ser un polímero resistente, flexible y blando, caracterizado por ramas largas que no se amontonan bien en los cristalitos [13].

Tabla 2.

Compendio de propiedades físicas del LDPE.

Propiedad	Valor / Rango	Referencia
Densidad	0,924 g/cm^3 0,915 a 0,925 g/mL	[40], [39]
Peso molecular	4×10^6 g/mol	[39]
Absorción de humedad en equilibrio	0,0100%	[41]
Permeabilidad al agua	@ 25C: $70 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ @ 38C: $120 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$	[42]
Permeabilidad al Dióxido de Carbono	@ 25C: $10 \times 10^{-13} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$	[42]
Permeabilidad al Hidrógeno	@ 25C: $8 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$	[42]
Permeabilidad al Nitrógeno	@ 25C: $0,17 \times 10^{-13} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$	[42]
Permeabilidad al Oxígeno	@ 25C: $2,2 \times 10^{-13} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$	[42]
Índice de oxígeno límite	17%	[42]
Transmisión de vapor de agua	10 - 16 $g/m^2/día$	[41]

Tabla 2. Continuación

Tasa de transmisión de oxígeno	2000 - 6820 $cc/m^2/día$	[41]
Transmisión de nitrógeno	3500 - 7500 $cc\ mm/m^2 - 24\ horas - atm$	[41]
Resistencia al agotamiento por estrés ambiental	3.00 - 500 horas	[41]
Cristalinidad	50 - 60%	[43]
Resistencia a la radiación	Aceptable	[42]
Resistencias a luz Ultra-Violeta	Mala	[42]

Nota. Esta tabla muestra el valor o rango de diversas propiedades físicas típicas de materiales poliméricos tipo LDPE en el grado de película mostrados en la literatura.

De acuerdo con pruebas de permeabilidad a gases, estrechamente relacionadas con la temperatura de medición, espesor y densidad de la muestra, el LDPE absorbe un mínimo porcentaje de agua y humedad en equilibrio (véase Tabla 2); donde a mayor densidad, menor permeabilidad. Posee baja permeabilidad al agua, dióxido de carbono, hidrógeno y nitrógeno; la permeabilidad a los gases se encuentra en el intervalo “esperado para materiales gomosos, dado que, en las zonas amorfas, el volumen libre y los movimientos segmentarios facilitan el paso de pequeñas moléculas” [6].

Su índice de fluidez es de 0,120 - 60 g/min y tiene una mala resistencia a la radiación con Ultra - Violeta (UV). “La exposición del PE a la radiación UV puede provocar fragilidad del polímero, esto se debe a la absorción de energía por los grupos carbonilo introducidos en la cadena durante la polimerización y/o procesamiento. Los grupos carbonilo absorben energía de longitudes de onda en el intervalo de 220- 320 nm” [6].

2.2 Propiedades químicas

La resistencia química del PE corresponde a la de un alcano, constituyéndose como un polímero, que cuenta con dos características: su estado inerte y estabilidad, al contar con una estructura parafínica. No es atacado químicamente por ácidos no oxidantes, álcalis ni muchas soluciones acuosas, dado que su estabilidad ante agentes solvolíticos como medios ácidos y alcalinos es satisfactoria. Sin embargo, tiene algunas reacciones que limitan sus usos y que exigen adoptar ciertas precauciones durante su tratamiento [53], [6].

Con base en estudios de inmersión desarrollados a temperatura ambiente, el polietileno presenta resistencia satisfactoria al metanol, limitada a la acetona e insatisfactoria a los hidrocarburos insaturados, benceno y tetracianuro de carbono. “El ácido nítrico oxida el polímero, lo que provoca un aumento del factor de potencia y un deterioro de las propiedades mecánicas. Al igual que ocurre con los alcanos simples, los halógenos se combinan con el hidrocarburo mediante mecanismos de sustitución” [6].

El polietileno es estable hasta 290°C en ausencia de oxígeno. Entre 290 y 350°C el polietileno comienza su proceso de descomposición generando polímeros de menor peso molecular. En temperaturas más elevadas se producen productos gaseosos como el butileno. Cuando hay presencia de oxígeno, el polietileno se desestabiliza. Son evidentes cambios en las propiedades físicas y químicas que dan cuenta de la degradación y oxidación [53].

“Dado que el PE es un polímero de hidrocarburos cristalino incapaz de interacción específica y con una temperatura de fusión de aproximadamente 100 °C, no hay disolventes a temperatura ambiente. Los polímeros de baja densidad se disuelven en benceno a aproximadamente 60 °C” [6]. A continuación, se agrupa el comportamiento (aumento en peso) de dos polietilenos ante diferentes solventes:

Tabla 3.

Absorción de líquidos por polietilenos de densidad 920 y 960 kg/m³ a 20 °C después de 30 días de inmersión.

Solvente	Parámetro de solubilidad $\sigma MPa^{\frac{1}{2}}$	% Incremento de peso en polímeros	
		920 kg/m ³	960 kg/m ³
Tetracloruro de carbono	17,5	42,4	13,5
Benceno	18,7	14,6	5,0
Tetrahidrofumano	19,4	13,8	4,6
Gasolina (BP 60-100 °C)	-	12,8	5,8
Éter dietílico	15,1	8,5	2,6
Aceite lubricante	-	4,9	0,95
Ciclohexanona	20,3	3,9	2,4
Acetato de etilo	18,6	2,9	1,6
Ácido oleico	-	1,81	1,53
Acetona	20,4	1,24	0,79
Ácido acético	-	1,01	0,85
Etanol	26,0	0,7	0,4
Agua	48,0	<0,01	<0,01

Nota. En esta tabla se compara el porcentaje de aumento en peso de polímeros de 920 kg/m³ y 960 kg/m³ ante diferentes solventes. Tomado de: *Brydson's Plastics Materials*. Disponible en: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpBPME0001/viewerType:toc//root_slug:brydsons-plastics-materials/url_slug:relation-structure-electrical?issue_id=kpBPME0001

Si el PE está expuesto a una tensión mecánica en determinados entornos, el tiempo de fractura es menor en el "*ambiente activo*", que en su ausencia. Este fenómeno se denomina agrietamiento por estrés ambiental (ESC), el cual se puede medir a través del empleo de la prueba ASTM D 1693. Se observa a menudo que los polímeros de baja densidad con un MFI de 20 y más se agrietan en una o dos horas [6].

Entre los posibles materiales *ambientes activos* se encuentran alcoholes, hidrocarburos líquidos, ésteres orgánicos, jabones metálicos, alcoholes sulfatados y sulfonados, poliglicol éteres y fluidos de silicona. Los líquidos más activos son aquellos que reducen la cohesión molecular en mayor medida. En ellos, también se observa que el efecto es más grave cuando están implicadas tensiones biaxiales (una condición que invariablemente provoca una mayor tendencia a la fragilidad) [6].

Con polímeros de baja densidad la ASTM D1693, generalmente muestra que, cuanto mayor es la masa molar, mayor es la resistencia. Los polímeros de baja densidad con un índice de flujo de 0.4 son inmunes a los detergentes comunes y al agrietamiento por tensión, esto debido a las buenas condiciones de procesamiento y el buen diseño. Lo cual hace que los tiempos de agrietamiento por tensión sean más largos que la vida útil requerida del producto [6].

2.3 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas del polietileno de baja densidad se encuentran vinculadas con las propiedades térmicas del material y velocidad de formación, situándose en medio de los materiales rígidos como el poliestireno y los plastificados blandos como el vinilo. El LDPE presenta “buena tenacidad y flexibilidad en un amplio rango de temperaturas, y su densidad disminuye rápidamente por encima de la temperatura ambiente, causando dificultad en algunos métodos de fabricación” [15].

De acuerdo a Jordan *et al*, se evidencia aumento de la tensión al incrementar la velocidad de deformación o disminuir la temperatura. En las propiedades de alta velocidad de los polímeros semicristalinos como el polietileno, la respuesta del material depende de la conformación molecular y fracción de volumen de cristalinidad. Sus redes moleculares se fundamentan en una fase amorfa con cadenas entrelazadas con la fase cristalina orientada al azar [12].

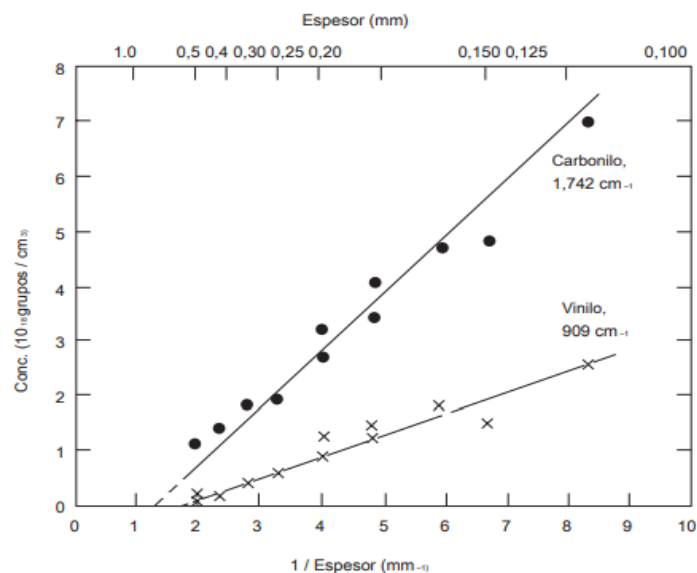
Las propiedades del polietileno son susceptibles a los cambios térmicos según la muestra. Al enfriarse, el polietileno da señales de cristalinidad menores, por lo cual suele ser resistente a posibles agrietamientos, se vuelve flexible y blando. El

tratamiento por agua hirviendo, da como resultado una consistencia cristalina, dura y quebradiza, produciendo cambios al elevarse la temperatura [53].

A pesar de sus propiedades excepcionales como un alargamiento de rotura extraordinariamente largo, el LDPE no presenta buena resistencia a la tracción. En un estudio desarrollado por Hammon *et al*, sobre las propiedades mecánicas de los polímeros no reforzados como el polietileno, se encontró que a medida que la pieza de PE se hizo más delgada en presencia de oxígeno, la concentración de los grupos carbonilo y vinilo aumentaba [45], tal y como se ilustra en la Figura 10.

Figura 10.

Incremento de los grupos carbonilo y vinilo en presencia de oxígeno



Nota. Nuevas concentraciones de grupos terminales en función del espesor original para una relación de estirado de 0,76 en oxígeno a 20 ° C. Tomado de: *Engineering Plastics*. (first edition) [En línea]. Disponible en: <https://ezproxy.uamerica.edu.co:2203/ehost/ebookviewer/ebook/ZTAwMHh3d19fNzk1MjMyX19BTg2?sid=3408f751-6674-4ae9-a498-2cdae4113496@sdc-vsessmgr02&vid=3&format=EB&rid=1>

Tabla 4.

Compendio de propiedades mecánicas del LDPE.

Propiedad	Valor / Rango	Referencia
Fuerza de tensión	10 MPa	[45]
Módulo de elasticidad	0,25 GPa	[45]
Alargamiento de rotura	400%	[45]
Elongación de la película en el rendimiento	5 - 520%	[41]
Módulo de flexión	0,214 - 0,262	[41]
Resistencia al desgarre	20 - 373 KN/m	[41]

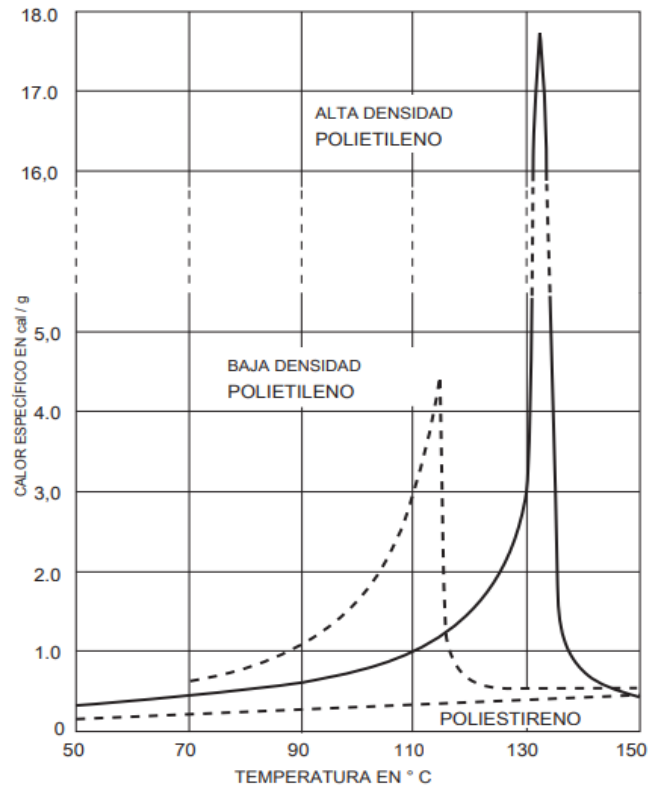
Nota. Esta tabla muestra el valor o rango de diversas propiedades mecánicas típicas de materiales poliméricos tipo LDPE en el grado de película mostrados en la literatura.

2.4 Propiedades térmicas

El punto de fragilidad de un polímero está directamente relacionado con el método de preparación, haciendo que el polímero sea más sensible a las imperfecciones superficiales. En general, a mayor masa molar y ramificación, menor punto de fragilidad. El polietileno de baja densidad presenta un valor alto de calor específico (2,3 J/g a temperatura ambiente), en relación con la mayoría de termoplásticos, obedeciendo a la temperatura [6]. En la Figura 11 se observa la variación de la temperatura de fusión (T_M) en función de la densidad.

Figura 11.

Relación del calor específico con la temperatura para el polietileno de baja densidad, polietileno de alta densidad y poliestireno



Nota. Los picos de las curvas corresponden a la entalpía de fusión de las zonas cristalinas. Tomado de: *Brydson's Plastics Materials*. (8va ed) [En línea]. Disponible en:

[https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpBPME0001/viewer
Type:toc//root_slug:brydsons-plastics-
materials/url_slug:relation-structure-
electrical?issue_id=kpBPME0001](https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpBPME0001/viewer>Type:toc//root_slug:brydsons-plastics-materials/url_slug:relation-structure-electrical?issue_id=kpBPME0001)

En los termoplásticos es común que las masas fundidas sean pseudoplásticas y similares, la viscosidad aparente de velocidad de cizallamiento cero de PE lineal está relacionado con la masa molar promedio en peso. El aumento de la temperatura reduce la viscosidad de la masa fundida, cuyo procesamiento es llevado a cabo en el rango de 150-210 °C. Sin embargo, si el contacto de la masa fundida con el oxígeno es reducido al mínimo, las altas temperaturas de procesamiento (300°C) no generarán problemas de degradación [6].

Tabla 5.

Compendio de propiedades térmicas del LDPE

Propiedad	Valor / Rango	Referencia
Coeficiente de expansión térmica	20 m/m/°C $\times 10^{-5}$	[45]
Temperatura de distorsión térmica a 0,45 MPa	50°C	[45]
Temperatura máxima de funcionamiento	50°C	[45]

Nota. Esta tabla muestra el valor o rango de diversas propiedades térmicas típicas de materiales poliméricos tipo LDPE en el grado de película mostrados en la literatura.

2.5 Propiedades eléctricas

Los polímeros industriales en general no son buenos conductores eléctricos, por lo que suelen ser empleados como materiales aislantes. Sus propiedades eléctricas están determinadas por la presencia de enlaces covalentes de mayor o menor polaridad y son poco sensibles a la microestructura cristalina o amorfa del material, que afecta en especial a las propiedades mecánicas [46].

Las propiedades que posee el PE se comparan con materiales dieléctricos. La potencia y la constante dieléctrica son características de la apolaridad del material. Su constante dieléctrica depende de la densidad presentada al calentarse [6].

La baja conductividad eléctrica del polietileno se hace evidente cuando presenta un factor de potencia bajo, y una elevada resistencia dieléctrica. Las propiedades eléctricas del PE no son receptivas a la humedad, lo que favorece la mínima absorción de agua del material. Sin embargo, la oxidación del PE con la formación de grupos carbonilo puede conducir a un aumento importante del factor de potencia, llegándose a dar la incorporación de antioxidantes en compuestos con finalidades eléctricas, para reducir tal efecto [53], [6].

Tabla 6.*Compendio de propiedades eléctricas del LDPE.*

Propiedades	Valor / Rango	Referencia
Resistividad de volumen	$10^{15} - 10^{18} \Omega \text{ cm}$	[6]
Resistencia eléctrica	500 - $1e+15$ ohmios-cm	[41]
Resistencia dieléctrica	20 kV/mm	[6]
Resistencia superficial	31000 - $1e+14$ ohmios	[41]
Constante dieléctrica	@ 920 kg/m^3 : 2,28 @ 960 kg/m^3 : 2,35	[6]
Factor de potencia	$\sim 1 - 2 \times 10^{-4}$	[6]
Factor de disipación	0,000200	[41]

Nota. Esta tabla muestra el valor o rango de diversas propiedades eléctricas de materiales similares al LDPE en el grado de película.

2.6 Propiedades ópticas

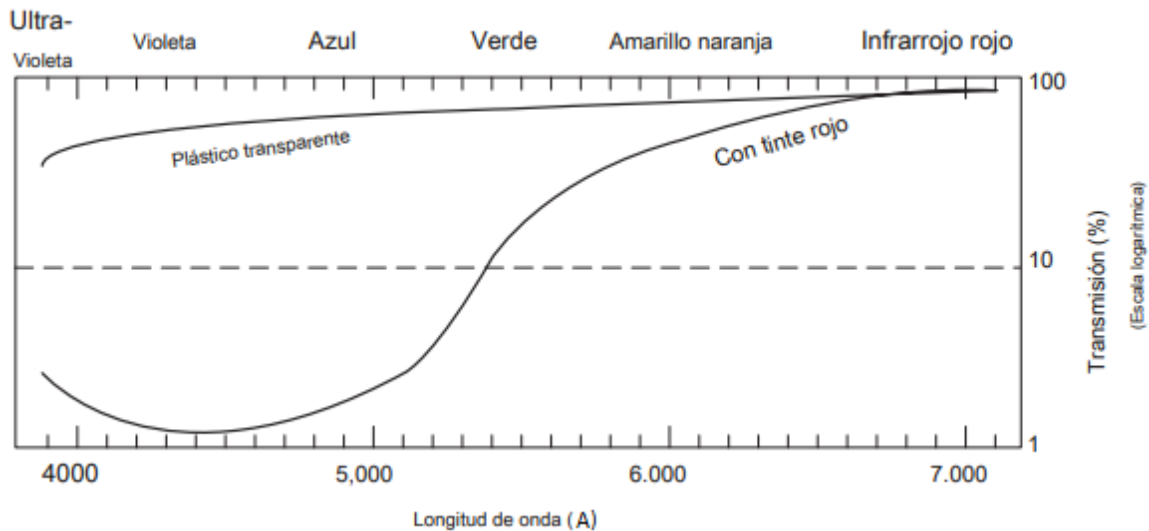
Las características ópticas de los polímeros involucran la apariencia, color, claridad e índice de refracción. “Para aplicaciones ópticas se deben considerar propiedades que incluyen la estabilidad dimensional, resistencia al rayado, limitación de temperatura, resistencia a la intemperie y absorción de agua” [45].

La *claridad óptica* es una medida de la capacidad de transmisión de luz del material, que se desvía por partículas de polvo, relleno, burbujas o cambios de densidad, cuantificada por la falta de neblina y depende de la longitud del camino de la luz. Un material es translúcido cuando su turbidez supera el 30%. El efecto de las interfases por rellenos se encuentra en función de la diferencia de índices de refracción. El PE es translúcido a temperatura ambiente, pero al calentarse se vuelve transparente,

dada la desaparición de los cristalitas. Los plásticos transparentes a temperatura ambiente son no cristalinos y sin cargas [45].

Figura 12.

Diagrama de transmisión de luz para el plástico

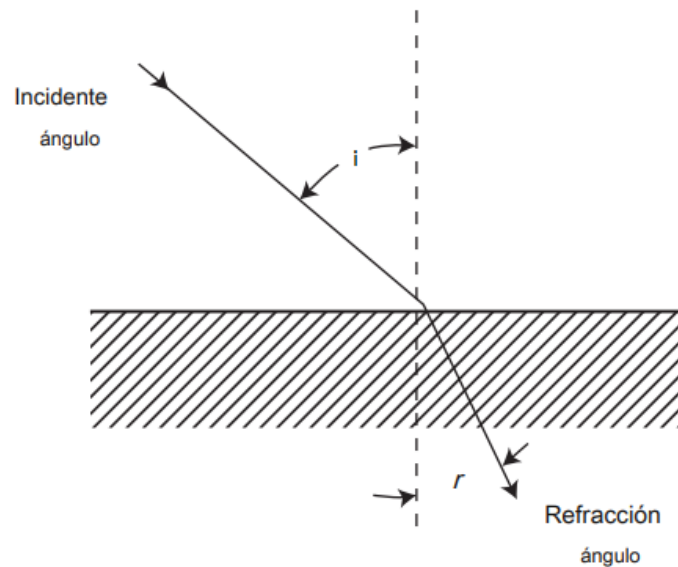


Nota. Se obtiene un color cuando un tinte elimina parte de la luz visible que viaja a través de la pieza. El color rojo, por ejemplo, es producido por un tinte que absorbe los componentes azul, verde y amarillo de la luz y transmite el rojo sin cambios. Tomado de: Engineering Plastics. (first edition) [En línea]. Disponible en: <https://ezproxy.uamerica.edu.co:2203/ehost/ebookviewer/ebook/ZTAwMHh3d19fNzk1MjMyX19BTg2?sid=3408f751-6674-4ae9-a498-2cdae4113496@sdc-v-sessmgr02&vid=3&format=EB&rid=1>

La mayoría de resinas naturales son claras y transparentes. Los materiales de color transparente son obtenidos añadiendo un tinte a una resina blanca como el agua; y presentan una tendencia natural a absorberse en el azul y amarillo. En materiales transparentes, el *índice de refracción* corresponde a la relación entre el seno del ángulo de un rayo incidente y el seno del ángulo de refracción como se observa en la Figura 13, de igual forma, hace referencia a la relación de la velocidad de la luz en el vacío a su velocidad en el material. La mayoría de los plásticos presentan dispersión óptica baja y la polarización se puede dar por el desplazamiento del centro de los electrones débilmente ligados con el núcleo [45].

Figura 13.

Refracción de la luz



Nota. El índice de refracción es igual a la fracción entre el seno del ángulo incidente y el seno del ángulo de refracción. Tomado de: *Engineering Plastics*. (first edition) [En línea]. Disponible en: <https://ezproxy.uamerica.edu.co:2203/ehost/ebookviewer/ebook/ZTAwMHh3d19fNzk1MjMyX19BTg2?sid=3408f751-6674-4ae9-a498-2cdae4113496@sdc-v-sessmgr02&vid=3&format=EB&rid=1>

El efecto de iluminación canalizada depende de la diferencia de los índices de refracción del aire y de un sólido transparente. La fibra óptica de polímero (POF) tiene un radio de curvatura corto de acuerdo al diámetro de la fibra; encontrándose que para POF con diámetro exterior de 125 mm, el diámetro de curvatura es de 0,125 cm y pérdida de intensidad de la flexión entre 10% y 15% para curvas cercanas al radio mínimo (umbral de daño).

En los plásticos transparentes, la tensión óptica es la base de la fotoelasticidad, donde la tensión y deformación pueden ser determinadas de forma experimental. La cantidad de deformaciones en varias partes se diagnostica con la medida de la anisotropía con luz polarizada, mientras que, para las tensiones bloqueadas, la cantidad de tensión se indica mediante el número de franjas visibles [45].

Tabla 7.

Compendio de propiedades ópticas del LDPE.

Propiedad	Valor / Rango	Referencia
Brillo	8,20 - 135%	[41]
Transmisión visible	55 - 90%	[41]
Índice de refracción	1,52	[53]

Nota. Esta tabla muestra el valor o rango de diversas propiedades ópticas típicas de materiales poliméricos tipo LDPE en el grado de película mostrados en la literatura.

2.7 Propiedades de procesamiento

La temperatura máxima de trabajo para los productos moldeados es más baja que la temperatura de ablandamiento o de fusión. “Las técnicas para conformar polímeros en formas útiles dependen en gran medida de la naturaleza del polímero, en particular, si es termoplástico o termoestable. El polímero se calienta a una temperatura cercana o superior a la de fusión, de modo que adquiera una baja viscosidad” [38].

Se cuenta con una diversidad de técnicas para transformar polímeros termoplásticos, donde el polímero se funde o inyecta dentro de un molde, o se le fuerza a pasar a través de una boquilla para producir la forma requerida. Entre los métodos más usados para su manufactura se encuentran la inyección, extrusión, soplado y termoformado.

2.7.1 Inyección

Es uno de los métodos más comunes para la manufactura de plásticos en masa, el material es alimentado a una inyectora, que lo plastifica y lo inyecta mediante un tornillo reciprocante a un molde donde el plástico se solidifica y retira [47]. La temperatura de fusión se sitúa entre 160-260 °C, la contracción posterior al molde se encuentra entre 1,5 y 3,5% y la presión de inyección de material puede ser de hasta 150 MPa [44].

2.7.2 Extrusión

Es un proceso continuo para la fabricación de materiales de sección constantes, el material sólido es plastificado y luego dosificado mediante un tornillo giratorio a través de una apertura con forma específica [47]. Su “temperatura de fusión se localiza entre 180 y 240 ° C, requiere de temperaturas de fusión más altas (280-310°C) para el recubrimiento por extrusión (280-310 ° C), temperaturas de fusión de 160-260°C, la contracción posterior al molde se encuentra entre 1,5 y 3,5% y se recomienda un tornillo de tres zonas con una relación L / D de alrededor de 25” [45].

2.7.3 Soplado

Medio de producción para objetos huecos con una sola apertura de menor tamaño que el diámetro mayor del objeto, en su mayoría primero se fabrica un tubo también denominado “parison” que es soplado dentro de un molde [47]. “Junto con el peso molecular (PM), y su distribución (DPM), las ramificaciones cortas también afectan el proceso de soplado de la película, influyendo en la solidificación de la película hasta la línea de nieve, ya que la cinética de cristalización depende de la distribución de estas ramas” [48].

2.7.4 Termoformado

Proceso en el que láminas de plástico son calentadas hasta ablandarse, estiradas mediante presión externa o vacío y conformadas al adherirse a un molde, en el que luego se enfrían. Los materiales más usados en el termoformado son los polímeros amorfos al poseer un rango de ablandamiento más amplio que los polímeros cristalinos [47].

Con todo lo anterior, a continuación, se muestra una tabla resumen de las propiedades mencionadas.

Tabla 8.*Caracterización del LDPE*

Propiedades físicas	Polímero flexible y blando con grado de cristalinidad medio, densidad de (0,910-0,925) g/cm^3 , peso molecular de 4×10^6 g/mol, mínima adsorción de agua y humedad en equilibrio, y mala resistencia a la radiación con UV [41], [13], [6].
Propiedades químicas	Resistente a ácidos no oxidantes, álcalis y muchas soluciones acuosas. Presenta resistencia satisfactoria al metanol, limitada a la acetona e insatisfactoria a los hidrocarburos insaturados, benceno y tetracianuro de carbono. No cuenta con disolventes a temperatura ambiente [6].
Propiedades mecánicas	Posee buena tenacidad y flexibilidad en un amplio rango de temperaturas, alargamiento a la rotura extraordinariamente largo; módulo de elasticidad de 0,25 Gpa y resistencia al desgarre de 20 - 373 KN/m [15], [45], [41].
Propiedades térmicas	El LDPE cuenta con un valor alto de calor específico (2,3 J/g a temperatura ambiente), coeficiente de expansión térmica de $20 \text{ m/m}^\circ\text{C} \times 10^{-5}$ y temperatura de distorsión térmica a 0,45 MPa de 50°C [6], [45].
Propiedades eléctricas	Los polímeros industriales no suelen ser buenos conductores eléctricos y sus propiedades eléctricas no son receptivas a la humedad, contando con una resistencia eléctrica de 500 - 1×10^{15} ohmios-cm y constante dieléctrica de 2,28 @ 920 kg/m^3 y 2,35 @ 960 kg/m^3 [53], [6], [41].
Propiedades ópticas	El PE es translúcido a temperatura ambiente, pero al calentarse se vuelve transparente. Con un brillo aproximado de 8,20 - 135%, transmisión visible de 55 - 90% e índice de refracción de 1,52 [45], [41], [53].

Nota. Esta tabla resume diversas propiedades de materiales poliméricos tipo LDPE en el grado de película mostrados en la literatura.

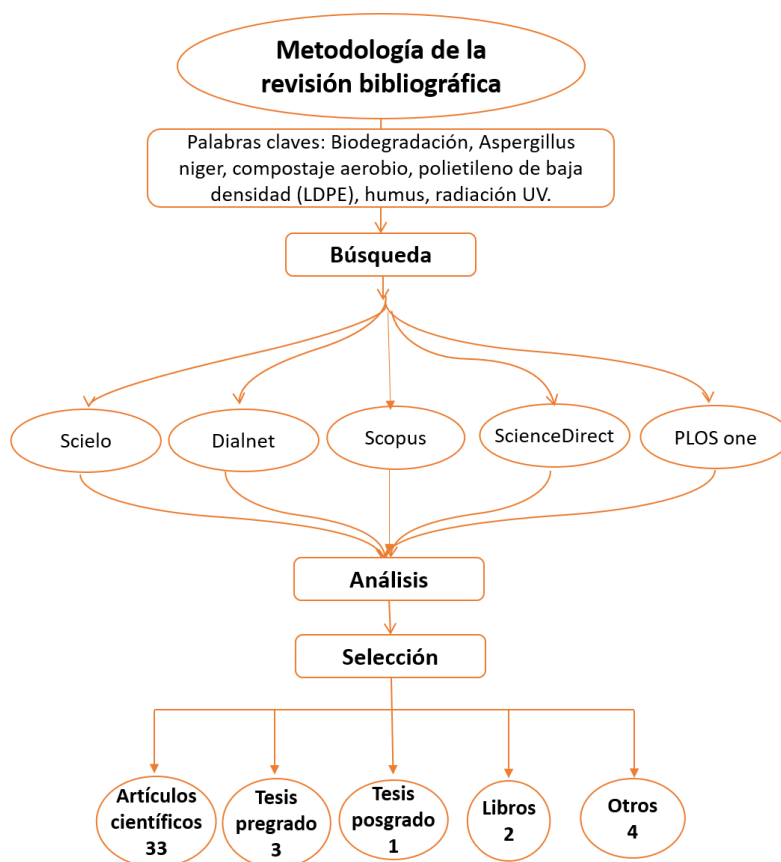
El polietileno de baja densidad ha encontrado un uso generalizado en virtud de sus propiedades, dentro de las que cabe mencionar su buena resistencia química, flexibilidad y dureza incluso a bajas temperaturas, falta de olor, facilidad de fabricación, no toxicidad, bajo costo, poca permeabilidad para el vapor de agua, excelentes propiedades de aislamiento eléctrico y ligereza de peso. Sumado a esto, la disponibilidad de gran cantidad de información sobre el procesamiento y propiedades del material, hace que sea un polímero conocido y comprendido.

3. CONDICIONES QUE FAVORECEN EL PROCESO DE BIODEGRADACIÓN DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD

En el presente apartado se explica la degradación por radiación, los sistemas de biodegradación de LPDE y sus respectivos medios degradativos. Adicionalmente se describen las condiciones propicias para la biodegradación de LDPE, como lo son: el pH, la temperatura, la humedad y los efectos de la radiación UV sobre el polímero. A partir de una metodología de revisión bibliográfica conforme a la Figura 14, donde se hizo uso de palabras claves relacionadas con la investigación en los buscadores de revistas científicas, luego se analizó la información encontrada considerando el grado de validez, claridad en la exposición de ideas y su aplicabilidad con base en los objetivos propuestos, para finalmente seleccionar 43 artículos.

Figura 14.

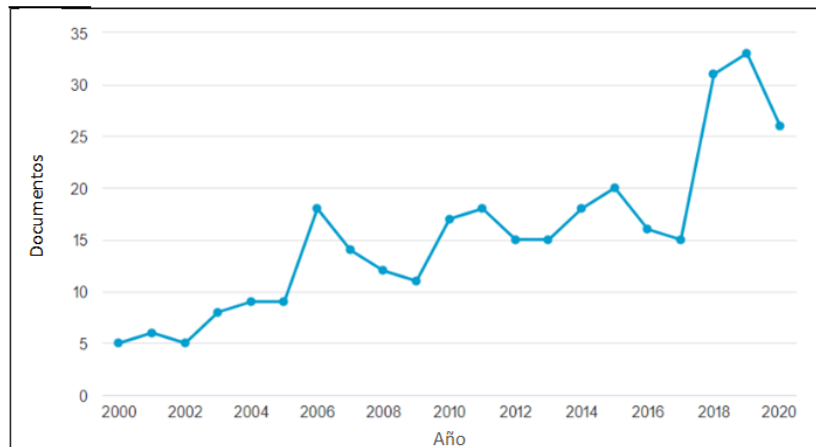
Metodología de búsqueda condiciones biodegradación



Nota. Revisión bibliográfica empleada para determinar las condiciones que favorecen la degradación del LDPE.

Figura 15.

Tendencia de investigaciones relacionadas al LDPE



Nota. Tendencia de los artículos relacionados con degradación de LDPE desde el 2000-2020. Tomado de: Scopus (s.f). "Biodegradation of LDPE". [En línea]. <https://www.scopuscom.ezproxy.uamerica.edu.co/term/analyzer.uri?sid=d049bbee7f00a2c7d0b757efc629e8e4&origin=resultslist&src=s&s=TITLEABSKEY+%28Biodegradation+of+LDPE%29&sort=plff&sd t=b&sot=b&sl=38&count=379&analyzeResults=Analyze+results&txGid=25be72052b3d359f9957274752509f89>

3.1 Degradación por radiación

Una de las fuentes de radiación UV es el sol, en donde el 6 a 7% corresponde a radiación ultravioleta que cubre un rango de longitud de onda entre (100-400 nm), la radiación UV es clasificada en 3 categorías dependiendo de la longitud de onda [49]:

- UV-A (320-400 nm)
- UV-B (280-320 nm)
- UV-C (100-280 nm)

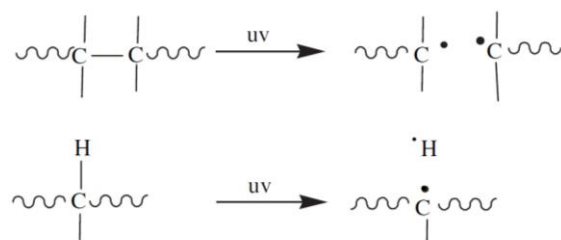
En ese sentido, es crucial mencionar que: "La radiación UV-B es eficaz para provocar fotodaños en polímeros sintéticos y la UV-C tiene suficiente energía para romper los enlaces σ " [50]. Aquellos plásticos como el LDPE se degradan por la acción de los rayos ultravioleta generados por el sol, provocando pérdida en la resistencia y con

ello, el polímero se fragmentará fácilmente en partículas diminutas [51]. Con suficiente entrada de energía luminosa, los grupos funcionales susceptibles, conocidos como cromóforos, se escinden para producir radicales libres [25].

La foto-oxidación de las películas de PE se desarrolla según el mecanismo de reacción Norrish Tipo I y II, este mecanismo consta de 4 etapas: iniciación, propagación, ramificación de cadena y terminación [50]. En la primera etapa, el polímero es expuesto a radiación o calor lo cual fomenta la formación de los radicales que se muestra en la Figura 16 [3].

Figura 16.

Iniciación

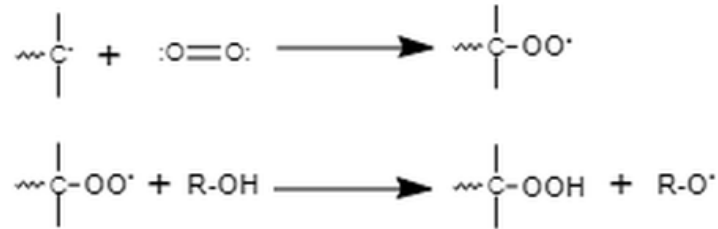


Nota. Representación de la formación de radicales C*. Tomado de: *Revisión Bibliográfica sobre los microorganismos biodegradadores de polietileno de baja densidad y sus efectos en el material*, [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/11349/5608>

Con la formación de los radicales C* se promueve la reacción con oxígeno formando el peróxido radical; como se muestra en la Figura 17, el cual reacciona con cualquier compuesto que ofrezca electrones y protones, formando un grupo funcional nuevo que puede ser un ácido o un éster [3].

Figura 17.

Propagación

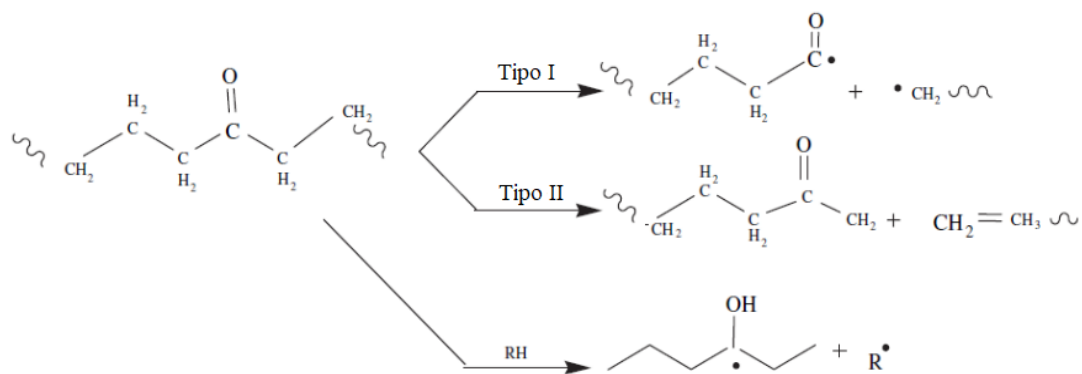


Nota. Formación del radical peróxido. Tomado de: *Revisión Bibliográfica sobre los microorganismos biodegradadores de polietileno de baja densidad y sus efectos en el material.* [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/11349/5608>

Los grupos carbonilo de la propagación, actúan como cromóforos que permiten la aparición de más radicales debido a que absorben la radiación UV, posteriormente ocurre una ruptura de las cadenas por medio de las reacciones tipo Norrish I y II como se muestra en la Figura 18, estas reacciones dan paso a la formación de grupos funcionales como alquenos, ésteres, alcoholes y ácidos carboxílicos [3], dichos grupos funcionales son utilizados por enzimas microbianas para su metabolización y mineralización [26].

Figura 18.

Terminación



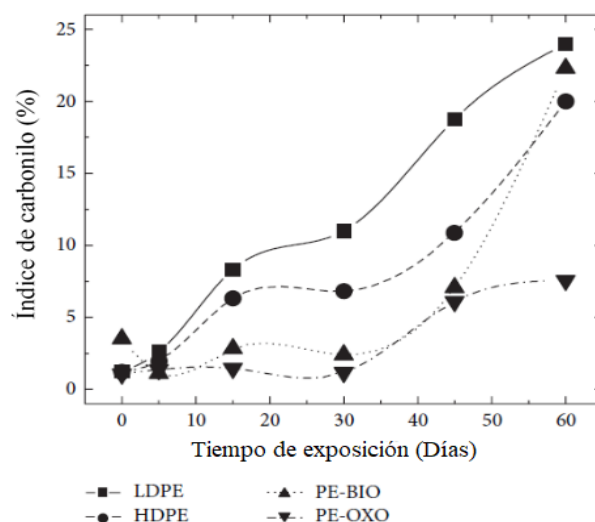
Nota. Mecanismos de reacción tipo Norrish I, II e incorporación de hidrógeno. Tomado de:

A. Martínez Romo, R. González Mota, J. J. Soto Bernal, & I. Rosales Candelas, presentaron los efectos de rayos UV sobre LDPE, PE-BIO, PE-OXO, HDPE con dimensiones de 40 x 50 mm y un espesor de 0.05 mm, estos polímeros fueron expuestos a radiación UV-B con lámpara de 280 y 320 nm; es necesario aclarar que el presente trabajo solo se enfoca en el análisis del LDPE [50].

Para determinar el índice de carbonilos (ICO) del LDPE, ejecutaron una prueba de espectrometría infrarroja (FTIR), en donde se obtiene la banda de absorción a 1740 cm^{-1} , que junto a la banda de absorción de 1835 cm^{-1} [3] permite construir una gráfica que evidencia el comportamiento del ICO de las muestras analizadas en intervalos de tiempo específicos (0, 5, 15, 30, 45 y 60 días); la Figura 19 refleja los datos obtenidos de ICO.

Figura 19.

Cambio en el índice de carbonilo para diferentes tipos de PE

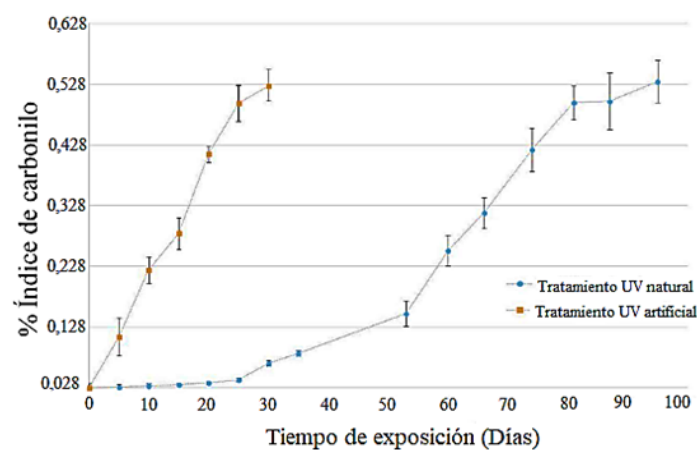


Nota. Variación del índice de carbonilo del PE con respecto al tiempo de exposición a la luz UV-B. Tomado de: “Investigating the Degradability of HDPE, LDPE, PE-BIO, [En línea] 10.1155/2015/586514 [14 de septiembre]

Otro trabajo fue el de Z. Montazer, M. B. Habibi-Najafi, M. Mohebbi, y A. Oromiehei, quienes usaron láminas de LDPE de 10µm de espesor sin aditivos [52], las cuales fueron expuestas a radiación UV-C artificial y natural. Para la irradiación artificial se implementaron 2 lámparas con una longitud de onda de 245 nm por 30 días, mientras que la irradiación UV natural del LDPE se ejecutó por 95 días [52]. Se contó con una prueba de espectroscopia FTIR realizada cada 5 días hasta cumplir con los lapsos de tiempos estipulados anteriormente; datos que permitieron la elaboración de la Figura 20.

Figura 20.

Efectos de la radiación UV artificial y natural



Nota. Cambio en el índice de carbonilos para radiación UV artificial y natural en intervalos de tiempo definidos. Tomado de: “*Microbial Degradation of UV-Pretreated Low-Density Polyethylene Films by Novel Polyethylene-Degrading Bacteria Isolated from Plastic-Dump Soil*” [En línea] 10.1007/s10924-018-1245-0 [26 de junio]

El LDPE expuesto a la radiación UV artificial presenta gran variación en sus resultados, en la Figura 19 el ICO a los 30 días es de 11% y en la Figura 20 el valor del ICO a los 30 días es de 52,8%; esto se debe a que la radiación UV-C sobrepasa la energía de los enlaces (300-600 kJ/mol) y provocará el rompimiento del esqueleto polimérico [50].

3.2 Biodegradación

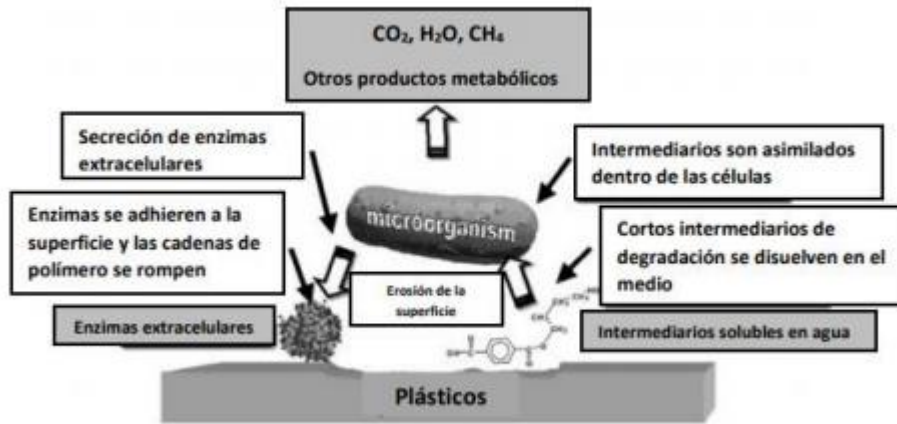
Es la transformación y deterioro de sustancias orgánicas por microorganismos vivos como hongos, bacterias, algas, protozoos y actinomicetos, que generan “procesos de digestión y metabolización, en donde se reciclan los elementos de la biosfera, restituyendo los elementos esenciales para la formación y crecimiento de nuevos organismos” [54].

La biodegradación de los plásticos puede llevarse a cabo mediante mecanismos en presencia de oxígeno (aerobios) como los presentados en la naturaleza, con la producción de CO₂, H₂O y sales minerales, o en ausencia de oxígeno (anaeróbica) en sedimentos y rellenos sanitarios con la producción de metano. Este proceso puede ser parcial o total. En la biodegradación parcial se altera la estructura química del material y se genera la pérdida de propiedades físicas y en la biodegradación total, se origina la mineralización del material por la acción de microorganismos [22], [13].

Los polímeros son sustratos potenciales para microorganismos heterótrofos, por consiguiente, su biodegradación dependerá de reacciones ocasionadas por el ataque microbiano, dada la producción de enzimas en la búsqueda de fuentes de carbono como alimento. El proceso está constituido por un sustrato que se une al sitio activo de una enzima, formando un complejo enzima-sustrato en el que interacciona el sustrato de la enzima y genera un producto, el cual sale del sitio activo de la enzima [13], [22].

Figura 21.

Mecanismo general de biodegradación en plásticos



Nota. La biodegradación del plástico en vertederos y abono, en condiciones metanogénicas produce biomasa microbiana, CO_2 , CH_4 y H_2O . Tomado de: *Degradación de Polietileno de Baja Densidad Utilizando Hongos. Revisión Sistemática de la Literatura.* Disponible en: https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/16184/YepesAguirreL_auraMaria2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Para que la biodegradación se produzca, se deben considerar las características del polímero, como las condiciones ambientales (temperatura, humedad, oxígeno), la naturaleza del pretratamiento, y una población adecuada de microorganismos. La morfología del polímero es de gran relevancia, dado que los grupos funcionales hidrolizantes deben ser accesibles para los microorganismos colonizadores, sumado a esto, son cruciales algunas características como el peso molecular, cristalinidad, sustituyentes en la estructura y aditivos son igual de importantes [55], [13].

La biodegradación del LDPE engloba la "adhesión, colonización y transformación del polímero a monómeros que pueden ser empleados como sustrato en reacciones enzimáticas" [56]. En la adhesión se producen polisacáridos como la quitina y glicano que permiten la fijación a la superficie del material, las depolimerasas extracelulares e intracelulares, y proteínas hidrofobinas que favorecen el incremento del micelio en la colonización y la entrada de los monómeros a las hifas para ser empleados como fuente de carbono. La transformación del LDPE es mediada por enzimas del sistema

ligninolítico que intervienen en la depolimerización y oxidación de las cadenas de carbono [56], [13], [19].

Las exoenzimas de los microorganismos descomponen las moléculas de gran tamaño del LDPE que no pueden ingresar a sus membranas celulares, originando moléculas de cadenas cortas: monómeros de etileno y dímeros de butano. La reducción del tamaño del polímero hace que deba ser “oxidado en un alcohol, aldehído y por último en un ácido carboxílico que pueda ser metabolizado por medio de la β -oxidación y el ciclo de Krebs en biomasa, CO₂ y H₂O” [56].

3.2.1 Tipos de biodegradación de LDPE

La biodegradación del LDPE puede ser macrobiológica y microbiológica. Kumar Kanchi, sugiere que ciertos insectos pueden secretar fluidos que degradan películas de PE [14], siendo un ejemplo del proceso de macrodegradación que descompone paulatinamente las partículas de PE, sin embargo, es un proceso poco estudiado, y no posee un impacto significativo en sus resultados.

No obstante, la biodegradación activa por microbios es más dinámica, involucrando bacterias y hongos comunes. Las bacterias prefieren fuentes de carbono simples como la glucosa para fines metabólicos. En un entorno selectivo, en el que las fuentes de carbono son restringidas, las bacterias y los hongos pueden llegar a consumir polímeros. Este proceso se hace más eficiente por el aislamiento, enriquecimiento, y estudio de microbios que degradan poliolefinas como LDPE [14].

3.3 Medios degradativos

3.3.1 Bacterias

Las bacterias son organismos unicelulares que se pueden involucrar en la biodegradación, algunas bacterias como *Lysinibacillus xylanilyticus*, *Pseudomonas putida* y *Pseudomonas aeruginosa* consumen el LDPE como fuente de carbono. Los medios que favorecen el crecimiento de dichos microorganismos están constituidos

por moléculas como: K_2HPO_4 , $(NH_4)_2SO_4$, $MgSO_4$, $CoSO_4$. Es preciso mencionar que las dos bacterias *Pseudomonas* metabolizaron el LDPE y generaron una pérdida de peso de un 20% y 11%, en solo 120 días. Por lo tanto, al considerar esta información se evidencia que otros microorganismos son entes biodegradadores de plástico [61], [62].

3.3.2 Hongos filamentosos

Los hongos filamentosos son organismos eucariotas pluricelulares, heterótrofos y aerobios. Su crecimiento les permite desarrollar un micelio aéreo con órganos de fructificación. Se reproducen por esporas de manera sexual o asexualmente, no realizan fotosíntesis al no poseer clorofila, y se nutren a partir de materia orgánica, presentan la pared celular formada por quitina fuertemente rígida. Viven en condiciones extremas como las altas concentraciones de azúcares y no son sensibles a la presión osmótica que se puede ejercer. Se multiplican en concentraciones altas de ácido y en medios bastantes alcalinos. El rango de pH para una gran mayoría es de 2,0 a 9,0, pero casi todos crecen mejor a un pH ácido, el óptimo se encuentra alrededor de 5,6 [55], [57].

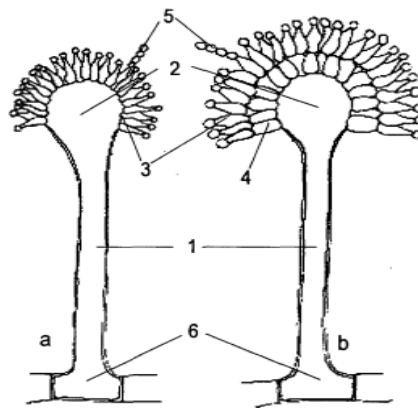
La fuente de carbono más utilizada en su metabolismo es la glucosa. Necesitan pequeñas cantidades de hierro, zinc, cobre, magnesio, fósforo y potasio. Suelen desarrollarse a temperaturas que pueden oscilar entre los 0°C y los 60°C, siendo su temperatura óptima de crecimiento de 22-30°C (la mayoría prosperan en condiciones cálidas con valores cercanos a los 25°C). Se desarrollan preferentemente en lugares húmedos y oscuros, y no necesitan de la luz para sobrevivir. Estos organismos son fundamentales en la degradación de la materia orgánica, en los flujos de nutrientes, y en diferentes tipos de simbiosis [55].

3.3.2.i. *Aspergillus niger*. Es un hongo filamentosos caracterizado por la presencia de hifas especializadas denominadas conidióforos, sobre los que se sitúan las células que generarán la formación de conidios (esporas asexuales). El conidióforo es una estructura unicelular que posee la vesícula (extremo apical hinchado), el estipe (sección cilíndrica situada debajo de la vesícula) y la célula pie que une el conidióforo con el micelio. Sobre la vesícula se localiza las fiálides, células que generan los conidios.

Sus hifas tabicadas con funciones nutricionales son más angostas que las hifas reproductivas, las cuales culminan en las cabezas aspergilaes y están compuestas por conidióforos cenocíticos largos y vesículas redondas de las que surgen las fiálides (en un ángulo de aproximadamente 360°), de las cuales nacen los microconidios [55]. Dentro del género *Aspergillus*, existen especies con presencia de métulas, células asentadas entre las vesículas y las fiálidades, las cuales reciben el nombre de biseriados; mientras que las especies sólo con la presencia de fiálides, se denominan uniseriados.

Figura 22.

Conidióforos del género Aspergillus.



Nota: a: uniseriado; b: biseriado. 1: estipe o “parte media del conidióforo”; 2: vesícula o “ápice hinchado del conidióforo”; 3: fiálide o “célula conidiógena”; 4: métula o “cédula soporte”; 5: conidio; 6: célula pie o “parte basal del conidióforo”. Tomada de: *Aportación al conocimiento de Aspergillus sección Nigri*. tesis pos. Facultad de veterinaria, Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, España, 2000. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/277094544_Aportacion_al_conocimiento_de_Aspergillus_seccion_Nigri

Aspergillus niger crece sobre la materia orgánica, desarrollándose en ambientes oscuros, húmedos y cerrados. Se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza.

Ha sido aislado del material vegetal en descomposición, del suelo, residuos, basura, compostaje y vías respiratorias. A su vez, ha sido hallado en granos de cereal, heno, tejidos de algodón, lana, plumas, ropa, flores y tumbas. Los seres humanos están expuestos a sus esporas diariamente, sin el riesgo de la manifestación de enfermedades.

Este microorganismo ha sido ampliamente investigado, contando en la actualidad con extensos usos a nivel industrial que incluyen la producción de ácido cítrico, fumárico y glucónico, la conservación de alimentos, su empleo como fuente de enzimas para el procesamiento de frutas, y también en industrias de almidón, la producción de enzimas y ácidos orgánicos de gran interés para las industrias farmacéuticas, para la elaboración de celulosa y catalasa. Sus estudios involucran la biodegradación de materiales plásticos, la remoción de metales pesados y un fertilizante biológico en huertas de tamaño reducido.

3.3.3 Medios de cultivo

Son mezclas de determinadas sustancias con o sin gelificación sobre las cuales crecen microorganismos en condiciones naturales con los nutrientes requeridos para sintetizar su material celular, generar energía y efectuar su fundamento para el que fueron tomados del ambiente [55].

Dentro de los medios de cultivo más empleados se encuentra: el extracto de malta, utilizado como un medio para cultivo de cepas, aislamiento y enumeración de hongos, el Agar czapek–dox, el cual se emplea para multiplicar hongos, levaduras y bacterias del suelo; y el caldo C. Czapek usado en el cultivo de hongos capaces de aprovechar el nitrato sódico como única fuente de nitrógeno, y la sacarosa como fuente de carbono [55].

Para que el microorganismo crezca satisfactoriamente, se deben considerar aquellos sustratos que favorecen el crecimiento y la expansión del mismo. El medio de cultivo (PDA) con Agar y papa dextrosa, puede suplir estas necesidades nutricionales. Este mecanismo de cultivo posee un pH bajo de 3,5 que evitará el crecimiento de las bacterias. También se puede implementar el medio de cultivo Czapek, el cual está conformado por: 15 g/L de Agar- Agar, 0.5/L g de KCl, 1.0 g/L de K₂HPO₄, 2 g/L de

NaNO₃, 30 g/L de sacarosa, 0.01 g/L de FeSO₄, 0.5 g/L de MgSO₄ y cloranfenicol [58], [59].

A su vez, el medio de cultivo Sabouraud Dextrose Agar genera condiciones que propician el crecimiento de hongos filamentosos, como un bajo pH (aproximadamente 5,6), favoreciendo el crecimiento en especial de dermatofitos, con un ligero efecto inhibitor para bacterias contaminantes [60]. Es empleado en procedimientos de cultivo cualitativos y la selectividad del medio para hongos puede ser incrementada mediante la adición de cloranfenicol, recomendando emplear Sabouraud Dextrose Agar con cloranfenicol para la cepa de *Aspergillus niger*.

Sabouraud Dextrose Agar contiene peptona, glucosa, agar, dextrosa, cloranfenicol, digerido pancreático de caseína, digerido péptico de tejido animal y agua destilada de acuerdo a las indicaciones de preparación del fabricante. Es un medio de peptona complementado con dextrosa para propiciar el crecimiento de hongos. “Las peptonas son fuentes de factores de crecimiento nitrogenados, la dextrosa proporciona una fuente de energía para el crecimiento de microorganismos y el cloranfenicol es un antibiótico de amplio espectro con efecto inhibitor para una amplia variedad de bacterias gram negativas y positivas” [60].

3.4 Sistemas de biodegradación

3.4.1 Compostaje

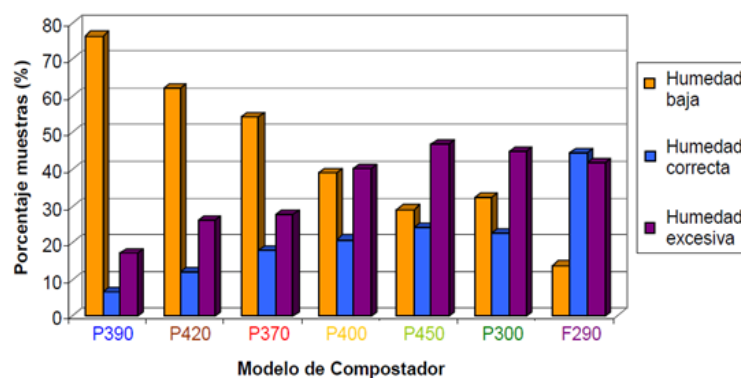
El compostaje es un proceso en el que, por medio de la acción microbiana, se da la transformación biológica de materias orgánicas en una sustancia denominada compost. En este proceso la biooxidación da como resultado la producción de dióxido de carbono, agua, minerales, y el compost [13].

En la biodegradación, el compost se combina con lodos y desechos sólidos [13], procurando que el material plástico se desintegre gradualmente y que no se distinga de los residuos orgánicos presentes. Se considera que: “un material o producto plástico ha demostrado una desintegración satisfactoria si después de la escala de laboratorio en el compostaje, no queda más del 10% de su peso seco original después del tamizado en un tamiz de 2,0 mm. Es decir, el 90% de la muestra de prueba debe pasar por un tamiz de 2,0 mm” [13].

En el compostaje los microorganismos secretan enzimas para transformar los desechos orgánicos en CO₂ y H₂O. Un compost maduro se puede implementar en la actividad agrícola, ya que mejora la estructura del suelo, reduciendo la erosión, y contribuyendo a que los cultivos absorban agua y nutrientes [63],[51]. Dependiendo del material de la pila o cajón de compostaje se verá afectada la humedad. Este factor es importante para el crecimiento de los microorganismos. A continuación, se explicará este comportamiento.

Figura 23.

Humedad en diferentes modelos de compostaje



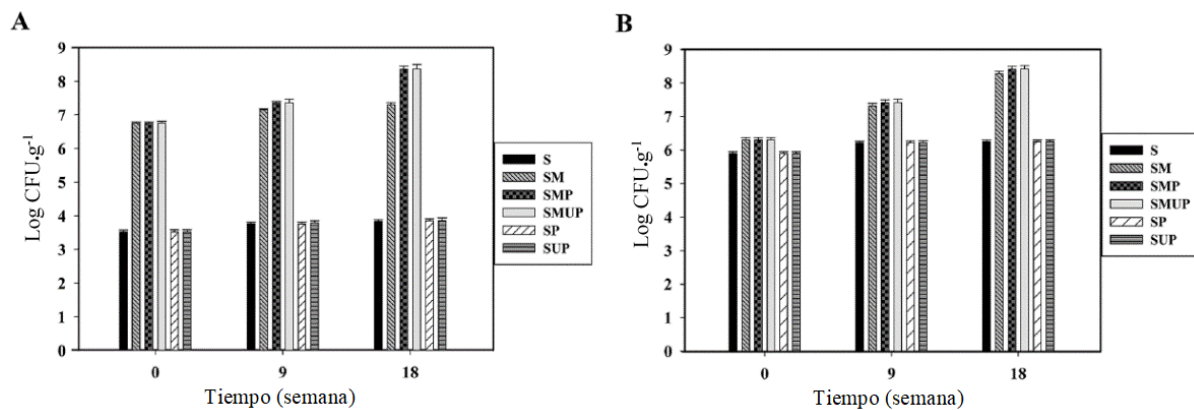
Nota. Variación de la humedad en las pilas de compostaje involucradas, (P390, P450, P420, P370, P400, P300): plástico, F290: Madera. Tomado de: E. Rudé Payró y R. Torres Castillo, “Evaluación de diferentes modelos de compostadores domésticos,” *Univ. Barcelona*, 2008, [En línea]. Disponible en: <http://www.compostaenred.org/documentacion/1casEvaluaci%C3%B3n%20de%20compostadores%20Barcelona.pdf> [Acceso: julio 5,2020]

Considerando los materiales involucrados en las pilas o cajas de compostaje, en la Figura 23 se presenta el comportamiento de la humedad en el experimento desarrollado por E. Rudé Payró y R. Torres Castillo; la gran mayoría de compostadores fabricados en plástico poseen una humedad baja, menor del 40%, por esta razón son secos. Aquellos compostadores con un 40%-60% poseen una humedad correcta [64], puesto que un valor alrededor del 50%, aumentará la población microbiana [65], y por encima del 60% los compostadores estarán tan húmedos [64], que favorecerá las condiciones anaerobias que retrasan la transformación de los residuos y liberan olores desagradables [65]. El compostador

fabricado en madera mantiene una humedad correcta, entre 40-60%; cabe aclarar que la influencia meteorológica tendrá una afectación significativa en la humedad [26], [64].

Figura 24.

Crecimiento de Aspergillus niger y Lysinibacillus xylanilyticus en suelo

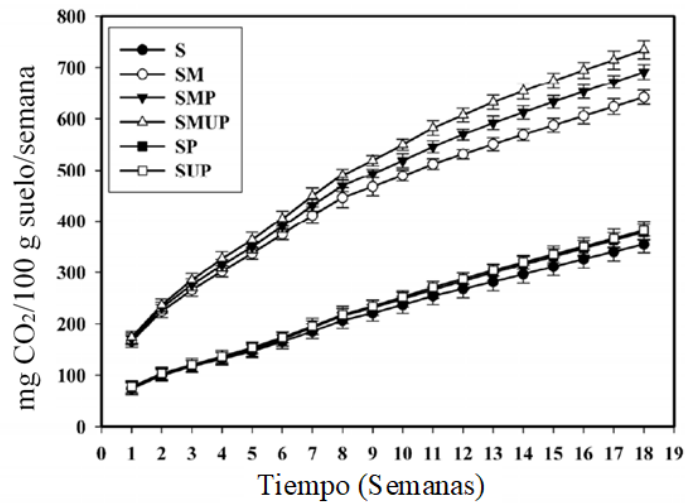


Nota. El crecimiento de (A) CFU de *Aspergillus niger*, (B) CFU de *Lysinibacillus xylanilyticus*. Solo en 3 montajes se implementaron dichas cepas con LDPE, (SM): Suelo + MO seleccionado, (SMP): Suelo + MO seleccionado + LDPE no irradiado, (SMUP): Suelo + MO seleccionado + LDPE irradiado con UV, por 126 días. Tomado de: A. Esmaili, A. A. Pourbabaee, H. A. Alikhani, F. Shabani, y E. Esmaili, "Biodegradation of Low-Density Polyethylene (LDPE) by Mixed Culture of *Lysinibacillus xylanilyticus* and *Aspergillus niger* in Soil," *PLOS One*, vol. 8, no. 9, Sep. 2013, [En línea]: doi.org/10.1371/journal.pone.0071720 [Acceso: junio 18,2020]

H. A. Alikhani, F. Shabani, y E. Esmaili estudiaron el crecimiento de *Aspergillus niger* (Figura 24A) y *Lysinibacillus xylanilyticus* (Figura 24B) por 126 días, con LDPE irradiado con UV y LDPE no irradiado, en un suelo que está compuesto por 35,8% de arena, 26,6% de arcilla, 37,6% de limo, con un pH de 7,5 y una humedad del 50%. En los montajes inoculados SM, SMP y SMUP, demostraron la mayor tasa de crecimiento para ambos microorganismos. En cuanto a los montajes S, SP, SUP se evidenció el crecimiento de otras cepas que son autóctonas del suelo y pueden utilizar una fuente de carbono diferente al LDPE [61].

Figura 25.

Generación de CO₂ en el proceso de biodegradación



Nota. Variación del grado de mineralización en los 6 montajes. Tomado de: A. Esmaili, A. A. Pourbabaee, H. A. Alikhani, F. Shabani, y E. Esmaili, "Biodegradation of Low-Density Polyethylene (LDPE) by Mixed Culture of *Lysinibacillus xylanilyticus* and *Aspergillus niger* in Soil," *PLOS One*, vol. 8, no. 9, Sep. 2013, doi: doi.org/10.1371/journal.pone.0071720 [Acceso: junio 18, 2020]

Para medir la biodegradación, H. A. Alikhani, F. Shabani, y E. Esmaili estimaron el grado de mineralización, lo que representa la generación de CO₂. Según la Figura 25, no hubo variación significativa en la conversión de CO₂ para los montajes no inoculados (S, SP, y SUP); a comparación con los montajes que fueron inoculados (SM, SMP y SMUP). Donde los montajes SM y SMP presentaron un alto grado de conversión de 610, 690 mg CO₂ suelo⁻¹. El montaje SMUP alcanzó 734 mg CO₂ suelo⁻¹ en 126 días, esto implica que las cepas *Aspergillus niger* y *Lysinibacillus xylanilyticus* utilizaron los grupos carbonilos de las películas irradiadas y no irradiadas de LDPE [61].

3.4.2 Relleno sanitario

Los plásticos dispuestos en los vertederos aumentan exponencialmente, y permanecen indeterminadamente debido a sus características de durabilidad y lenta

degradación [66]. A. Vélez Pereira & Camargo, por medio de la implementación de estaciones de monitoreo provistas con cajas de petri y agar Sabouraud dextrosa en el relleno sanitario del distrito de Santa Marta, Palangana, investigaron los microorganismos presentes y evaluaron la concentración de los mismos en las distintas áreas del relleno sanitario [67]. En la Tabla 9 se evidencian los hongos en mayor proporción encontrados.

Tabla 9.

Hongos asociados al relleno sanitario de Santa Marta, Palangana.

Género	Zonas del relleno sanitario			
	Celda activa	Celda pasiva	Piscina de lixiviados	Total
<i>Aspergillus flavus</i> (UFC/m ³)	671,38	647,82	376,91	1696,11
<i>Aspergillus fumigatus</i> (UFC/m ³)	129,56	200,24	176,68	506,48
<i>Aspergillus niger</i> (UFC/m ³)	1201,41	777,39	765,61	2741,41
<i>Aspergillus terreus</i> (UFC/m ³)	1201,41	223,79	1036,51	2461,71

Nota. En la tabla se presentan las concentraciones de los hongos en Unidades formadoras de colonias/volumen de aire (UFC/m³). Tomado de: A. Vélez Pereira, Y. Camargo, "Evaluación de la concentración de bioaerosoles fungi asociados al relleno sanitario Palangana, Santa Marta-Colombia", Sep. 2009. [Online]. Disponible en: <http://www.redisa.net/doc/artSim2009/TratamientoYValorizacion/Evaluaci%C3%B3n%20de%20la%20concentraci%C3%B3n%20de%20bioaerosoles%20Fung%C3%AD%20asociados%20al%20relleno%20sanitario%20Palangana.pdf> [Acceso: diciembre 13, 2020]

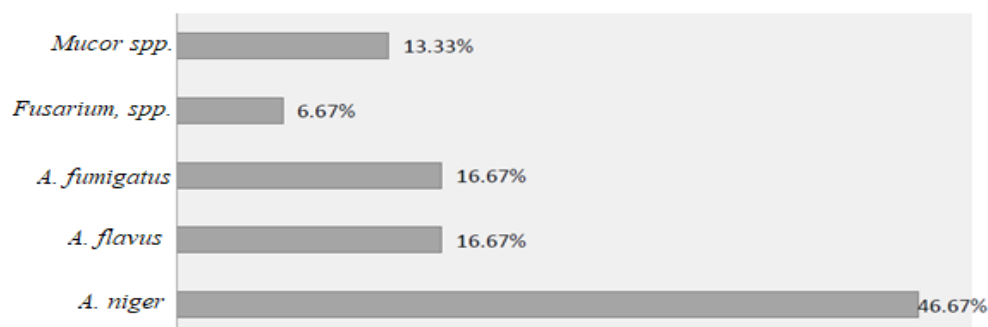
Partiendo de los datos de la Tabla 9 resultante de la investigación de A. Vélez Pereira & Camargo, se infiere que *Aspergillus niger* presenta mayor crecimiento y, por ende, se podrá disponer de residuos plásticos de LDPE para su posterior aprovechamiento por parte del hongo [68], [67].

V. C. Gonzales Alcos, recogió 20 muestras de suelo del botadero de Cancharani ubicado en el departamento, provincia y distrito de Puno en Perú, a una profundidad de 20 a 50 cm. En la Figura 26 se observa el crecimiento de los microorganismos

aislados, en donde *Aspergillus niger* es la cepa dominante, seguido de *Aspergillus flavus*, *Aspergillus fumigatus*, *Fusarium spp* y *Mucor spp* [55].

Figura 26.

Crecimiento de hongos filamentosos del botadero Cancharani



Nota. Microorganismos presentes en el botadero Cancharani. Tomado de: V. C. Gonzales Alcos, *Capacidad biodegradativa de hongos filamentosos frente al polietileno*, Tesis doc. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú, 2019, [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/12254>

Las cepas *Aspergillus niger* y *Aspergillus flavus* son dominantes. Tras entrar en contacto con láminas de 2x2 cm de LDPE por 60 días, *Aspergillus flavus* colonizó la lámina por encima y debajo, a su vez, se evidenció la formación de una biopelícula gruesa. Esto demuestra que el hongo se adhiere con facilidad a la lámina. Por otro lado, *Aspergillus niger* afectó las láminas por debajo, así como en los laterales con la generación de una biopelícula delgada [55].

Luego de los 60 días, las láminas se sometieron a estereoscopio, algunas formaron un poco de porosidad y una pérdida de brillo, esto comprueba el proceso metabólico efectuado por las cepas. Para evidenciar que ambas cepas consumieron el LDPE como su fuente de carbono se pesaron las láminas antes y después del proceso de biodegradación, estos datos se evidencian en la Tabla 10 [55].

Tabla 10.

Efectos de Aspergillus niger y Aspergillus flavus en el peso molecular

Medio de cultivo	Micromiceto	Incubación por 60 días (2x2)			
		T (°C)	pH	PI (g)	PF(g)
CCSM (C.cazpeck)	<i>A.niger</i>	20	4,5	0,024	0,0152
			8,0	0,026	0,023
		30	4,5	0,027	0,0178
			8,0	0,024	0,0213
	<i>A.flavus</i>	20	4,5	0,030	0,0165
			8,0	0,037	0,0282
		30	4,5	0,028	0,0159
			8,0	0,025	0,0221

Nota. Descenso del peso del LDPE efectuado por *Aspergillus niger* y *Aspergillus flavus*. Tomado de: V. C. Gonzales Alcos, *Capacidad biodegradativa de hongos filamentosos frente al polietileno*, Tesis doc. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú, 2019, [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/12254>

3.4.3 Biorreactores

La materia orgánica se puede tratar en equipos estáticos o dinámicos, conocidos como reactores [2], “este tipo de sistemas permite acelerar el proceso de compostaje, son sistemas industriales y se aplican en aquellas situaciones donde diariamente se reciben volúmenes importantes de desechos para los cuales es necesario disponer de superficies muy extensas” [2].

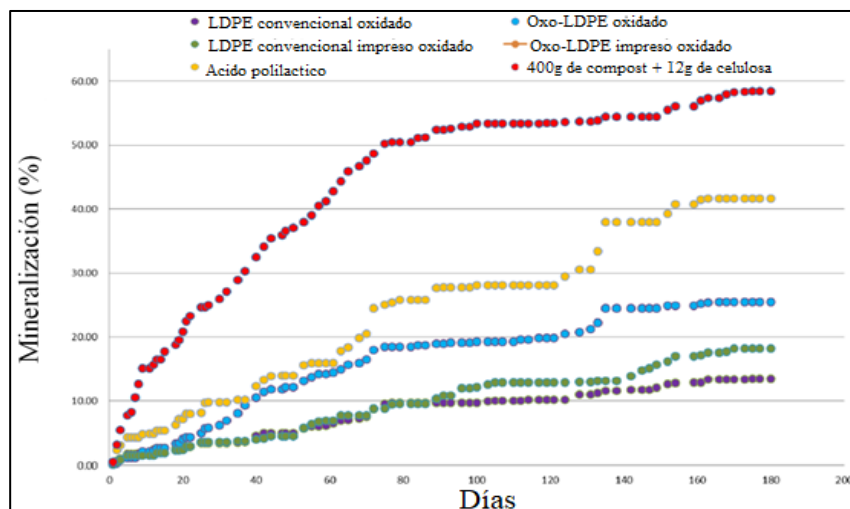
Para evaluar la biodegradación de muestras de plástico bajo condiciones del modelo de compostaje aerobio intenso, se sigue la norma ASTM D-5338-98. A.Vázquez *et al* implementaron 400 g de compostaje maduro elaborado con residuos vegetales en un reactor junto con muestras de PLA (ácido poliláctico), polietileno de baja densidad virgen (LDPE), polietileno de baja densidad impreso (LDPE-P), polietileno de baja

densidad con aditivo oxodegradable (OXO-LDPE) y polietileno de baja densidad impreso con aditivo oxodegradable (LDPE-OXO-P). El aditivo que se involucra en los polímeros se conoce como d2w, con unas dimensiones 0.1-2 cm en una proporción del 3% en peso [26].

El proceso de biodegradación desarrollado por A.Vázquez *et al* se llevó a cabo en 180 días, en los cuales se agregó suficiente agua para lograr una humedad de 55-60%. Se determinó un pH cerca de la neutralidad, y se controló la temperatura operativa del reactor en 58 ± 2 °C. En este tiempo se monitoreó la generación de CO₂, considerado el carbono total producido y el carbono teórico de las muestras involucradas [26], para luego calcular el porcentaje de mineralización presentado en la Figura 27.

Figura 27.

Mineralización de LDPE



Nota. Se observa el porcentaje de mineralización de las muestras de LDPE virgen y oxodegradable. Tomado de: A.Vázquez *et al*, “Biodegradation and ecotoxicity of polyethylene films containing pro-oxidant additive”, *J Polym Environ*, vol. 24, pp.221–229, abril, 2016 [En línea] 10.1007/s10924-016-0765-8 [Acceso: septiembre 3, 2020]

En la Figura 27 todas las muestras presentan biodegradabilidad, incluido el polietileno convencional. Esto se le atribuye al proceso de oxidación, que tuvo lugar antes de la biodegradación, aunque afectó en mayor grado a los plásticos oxodegradables [26].

Para la degradación de materia orgánica en compostaje aerobio se contempla un modelo cinético de primer orden que describe la mineralización microbiana, representada con el coeficiente K (Coeficiente de mineralización microbiana). La siguiente expresión cinética contemplan la relación carbono/ nitrógeno (C/N) [78], [79].

Ecuación 1.

Mineralización microbiana

$$\text{Primer orden: } in [C/N] = K_1 t + in [C/N]_0$$

La constante K considera ciertos parámetros del proceso de compostaje, como lo son la conductividad eléctrica (EC), la temperatura (T (°C)), la concentración de oxígeno (O₂), pH y humedad (Mc). Parámetros involucrados en las reacciones que se contemplan en la Tabla 11:

Tabla 11.

Modelos cinéticos involucrados en el proceso de compostaje

#	Ecuación	Parámetros cinéticos					
		a	b	c	d	f	g
1	$K = a \cdot \exp \left[(b \cdot T) + \left(c \cdot \frac{Mc}{T} \right) \right]$	1.18	0.05	-0.76	0	0	0
2	$K = a \cdot \exp \left\{ b \cdot \left[\left(\frac{M_i - c}{d} \right) + \left(\frac{T - f}{g} \right) \right] \right\}$	0.02	1.71	0.69	-0.38	0.81	0.57
3	$K = \frac{a}{T - (C \cdot b)} \cdot \exp \left\{ \left[(T \cdot c) + \left(d \cdot \frac{Mc}{T} \right) \right] \right\}$	115.29	-7.63	0.09	-0.09	0	0
4	$K = a \cdot b^c \cdot \exp \left\{ \left[(c \cdot T) - \left(d \cdot \frac{Mc}{T} \right) \right] \right\}$	0.31	0.89	0.07	0.38	0	0
5	$K = a \cdot b^{O_2} \cdot \exp \left\{ \left[(c \cdot T) + \left(d \cdot \frac{Mc}{T} \right) \right] \right\}$	0.19	0.65	0.08	0.26	0	0
6	$K = a \cdot \exp \left\{ \left[(b \cdot T) + \left(c \cdot \frac{O_2}{T} \right) - \left(d \cdot \frac{EC}{T} \right) \right] \right\}$	6,5x10 ⁻⁴	0.11	46.78	-43.05	0	0
7	$K = O_2^{(1-a)} \cdot b^{(T-23)} \cdot pH^c \cdot \left(\frac{Mc}{T} \right)^d$	1.27	1.07	0.01	-0.15	0	0

Nota. Ecuaciones para hallar el coeficiente de mineralización microbiana con sus respectivos parámetros cinéticos. Tomado de: Saldarriaga. J. F, Gallego J. L, López J. E, “*Determination of kinetics parameters for composting process of the organic fraction of municipal solid waste separated at source*”, *AIDIC*, vol 70, pp 217-222, enero, 2018, doi: 10.3303/CET1870037

Considerando las ecuaciones representadas en la Tabla 11, los modelos 1, 2, 3 y 4 contemplan la temperatura y la humedad, pero es necesario relacionar otros parámetros como el pH y la concentración de O₂. Por lo que se sugiere implementar ecuaciones de la 5 a la 7, ya que estos modelos involucran un mayor número de variables que son importantes para la degradación del material orgánico [80].

Dado que en el estudio de A.Vázquez *et al* se involucró LDPE convencional, se debe considerar la energía de activación (E) y el factor de frecuencia (A) de este polímero; parámetros calculados por P. Das y P. Tiwari mediante el desarrollo de un análisis termogravimétrico en un intervalo de 303-973 K para posteriormente calcular dichos parámetros por medio de los métodos isoconversionales [81].

Tabla 12.

Métodos isoconversionales

Polímero	Método isoconversional	E (kJ/mol)	A (min ⁻¹)
LDPE	FR: Friedman	178 - 256	2.79 x10 ¹¹ -1.64 x10 ¹⁷
	OFW: Ozama-Flynn-Wall	165 - 242	5.77 x10 ¹⁰ -1.78 x10 ¹⁶
	KAS: Kissinger-Akahira-Sunose	162 - 242	3.67 x10 ¹⁰ -1.72 x10 ¹⁶
	Starink	148 - 222	4.07 x10 ⁹ -8.44 x10 ¹⁴
	AIC: Advance isoconversional method	170 - 231	9.19 x10 ¹⁰ -3.59 x10 ¹⁵

Nota. Se presentan los diferentes modelos para calcular la energía de activación y el factor de frecuencia. Tomado de: P. Das, P Tiwari, “*Thermal degradation kinetics of plastics and model selection*”, *TA*, vol. 654, pp 197-202, agosto, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2017.06.001>

Teniendo en cuenta a P. Das, P Tiwari, la energía de activación obtenida por los métodos isoconversionales difiere ligeramente entre sí, especialmente con el método Friedman, el cual presentó una dispersión mayor debida a la diferenciación numérica que genera ruido en los resultados. Los parámetros calculados por los otros métodos

son muy similares o cercanos y se sustituyen en la ecuación de Arrhenius para analizar el comportamiento de la constante cinética a diferentes temperaturas [81].

3.5 Factores recomendados en los procesos de biodegradación del LDPE

Para que el PE sea biodegradable, es necesario modificar su nivel cristalino, su peso molecular, temperatura vítrea y resistencia dieléctrica; propiedades responsables de la resistencia del PE a la degradación [13]. Para lograr dicho cometido se recomienda implementar las siguientes variables:

3.5.1 Nutrientes

La relación carbono/nitrógeno es importante para que los microorganismos degraden los residuos eficientemente. Se considera apropiado utilizar una relación 25-35 unidades de carbono/1 unidad de nitrógeno. Si dicha relación aumenta por encima de 40, la actividad microbiana se limitará debido a la falta de nitrógeno, lo que impedirá la formación de aminoácidos. Si la relación de carbono/1 unidad de nitrógeno es menor de 20 se liberarán gases de efecto invernadero [65].

3.5.2 Temperatura

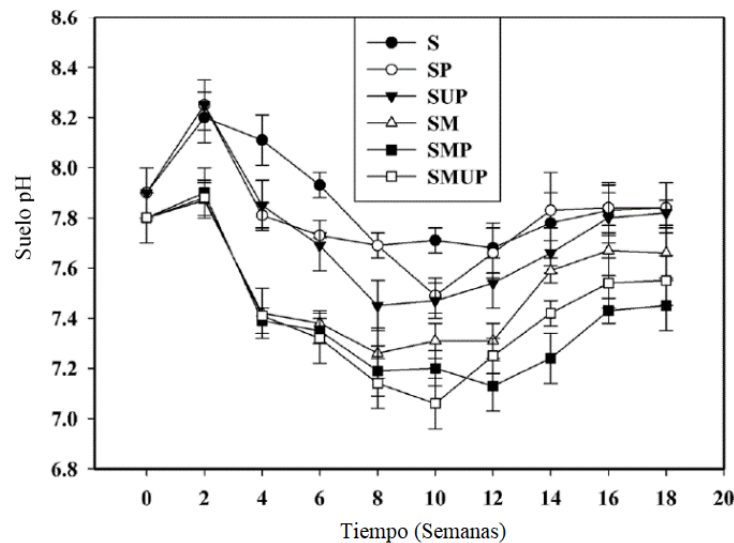
Considerando las características del LDPE, en los bioreactores el intervalo de temperatura de $58 \pm 2^\circ\text{C}$ genera una mayor afectación sobre las muestras que contienen aditivo d2w [26]. Además, el proceso con *Aspergillus niger* se puede llevar a cabo a una temperatura entre 6-47 °C [68].

3.5.3 pH

El valor de pH es un factor clave para la supervivencia y actividad de los microorganismos, generalmente el pH debe estar entre 6 y 8 para un crecimiento óptimo, pero estos valores pueden variar dependiendo del microorganismo involucrado en el proceso de degradación. Si en el proceso se presenta la cepa *Aspergillus niger* se verá favorecida la colonización en un pH básico de 8,0 [61], [55]. No obstante, el microorganismo puede colonizar y sobrevivir en un rango de pH más amplio. En la Figura 28 se evidencia el cambio del pH en los montajes propuestos.

Figura 28.

Cambio del pH del suelo involucrado en biodegradación



Nota. Variación de pH debido a la actividad metabólica de los microorganismos. Tomado de: A. Esmaeili, A. A. Pourbabae, H. A. Alikhani, F. Shabani, y E. Esmaeili, "Biodegradation of Low-Density Polyethylene (LDPE) by Mixed Culture of *Lysinibacillus xylanilyticus* and *Aspergillus niger* in Soil," *PLOS One*, vol. 8, no. 9, Sep. 2013, [En línea] doi.org/10.1371/journal.pone.0071720 [Acceso: junio 18, 2020]

3.5.4 Radiación

La radiación UV genera cambios en las siguientes propiedades: resistencia a la ruptura, factor de pérdida dieléctrica y las características mecánicas. Estas propiedades se verán afectadas principalmente por la radiación UV de longitud de onda corta, en un intervalo de 100-280 nm. Intervalo en el que se suministra la energía necesaria, la cual se estima entre 300-600 kJ/mol, para romper los enlaces covalentes del LDPE. Por otro lado, la resistencia a la ruptura disminuye en un $7,0 \pm 2,6\%$ [69] y el factor de pérdida dieléctrica también se minimiza. Este comportamiento se debe a la polarización de la carga espacial, causada por las cargas de los grupos funcionales [70].

Considerando el comportamiento de las variables previamente explicadas, se recomienda exponer el LDPE a radiación UV de longitud de onda corta entre 100-280

nm para lograr suministrar la suficiente energía que generará rupturas. En cuanto a la temperatura se debe alcanzar un rango entre 35-37°C, valores en los que la concentración de *Aspergillus niger* será mayor y la actividad metabólica de este microorganismo debilitará las propiedades anteriormente mencionadas. El pH debe ser mayor a 7,5; puesto que, por encima de este valor, se favorece la degradación del material orgánico y también el crecimiento del hongo [70], [68].

Las Tablas 13 y 14 representan los estudios realizados por diferentes autores sobre sistemas o métodos para degradar el LDPE.

Tabla 13.

Tipos de degradación

Parámetro	Valor / Rango	Tipos de degradación	Tiempo	Resultados	Ref
Temperatura	70 °C	Oxidación	39 días	Las películas de LDPE sin aditivos presentaron una disminución nula de su peso molecular, en cambio para las películas de LDPE con aditivos oxodegradables el peso molecular fue menor de 8400 Da.	[26]
Temperatura	96 °C	Hidrólisis	14 días	La concentración promedio de grupos que contienen oxígeno en las muestras, disminuye al aumentar el espesor. Este hallazgo sugiere que el proceso de oxidación del LDPE se regirá por la difusión de oxígeno desde el medio acuoso a la muestra.	[31]
Temperatura	500-700 °C	Pirólisis	N/A	<i>Pirólisis térmica:</i> produce cera, aceite y gases. La presencia de dichos componentes depende de la temperatura, por debajo de los 600°C se tendrá una mayor proporción de cera. Entre 500°C – 700°C, aparecerá cera, aceites, y gas.	[35]

Tabla 13. Continuación

Temperatura	50-500 °C		100 min	<p><i>Pirólisis catalítica:</i> la presencia del catalizador reduce la energía de activación para aumentar la velocidad de la reacción. Se presenta un mayor rendimiento a una temperatura de 450 °C. Una cantidad de catalizador de 15% p/p generará mayor proporción de aceites, mientras que 10% p/p generará mayor producción de gas.</p>	[36]
Radiación UV	245 nm	Pretratamiento	30 días	<p>El cálculo del índice de carbonilo (<i>ICO</i>) en intervalos de tiempo fue de: 12,6% en 5 días, para 10 días 22,7% y en 15 días 27,8%. En los días 25 y 30 se reportaron los índices <i>ICO</i> más altos, 50% y 52,8% respectivamente.</p>	[52]
	(280 y 320) nm		60 días	<p>Para analizar el comportamiento del pretratamiento, se calculó el índice de carbonilo (<i>ICO</i>) en intervalos de tiempo. En 5 días el <i>ICO</i> fue de 2,5%, a los 15 días presentó un valor de 7,8%, 10,8% para 30 días, 18% en 45 días y finalmente un <i>ICO</i> de 23,5% para el día 60.</p>	[50]
	340 nm		400h	<p>Se ejecutó una prueba de elongación después de la radiación UV, en donde el porcentaje de elongación hasta la ruptura fue del 7,0 ± 2,6%.</p>	[69]

Nota. En la tabla se evidencian los parámetros de temperatura y longitud de onda implementados por los autores.

De la información expresada en la tabla anterior se concluye que en la oxidación se incorpora el oxígeno en la cadena principal del LDPE. La integración de esta molécula afectará propiedades del polímero, principalmente su peso molecular y rigidez, características que disminuyen a medida que la temperatura aumenta, pero cabe aclarar que si se ejecuta a temperaturas muy altas se estará favoreciendo la incineración [26].

Por el contrario, la absorción de H₂O en el polímero es baja considerando su característica hidrofóbica, no obstante, la molécula de H₂O se puede incorporar con mayor facilidad en aquellos polímeros injertados o con aditivo. Debido a esto se reduce la temperatura vítrea, resistividad dieléctrica, este proceso no tiene muchos estudios ya que el LDPE virgen es hidrofóbico [31].

Por otra parte, en la pirólisis térmica y catalítica se generan gases y aceites de bajo octanaje, estos productos pueden ser aprovechados en otras industrias, teniendo en cuenta que si se ejecuta sin catalizador el proceso requerirá una alta carga energética, en cambio sí se involucra un catalizador la carga energética será menor considerando que el catalizador de caolín opera mejor a temperaturas altas como los 450°C [35], [36].

Finalmente, la estructura del LDPE se ve afectada por los rayos UV C de longitud de onda corta, ya que tiene la suficiente energía para romper los enlaces covalentes, presentando rupturas en su cadena principal, y a su vez, permitiendo que el oxígeno se incorpore con mayor facilidad a la estructura. Posteriormente, a través de los mecanismos de reacción Norrish tipo I, II, se presentarán los grupos carbonilos cetonas, aldehídos y ácidos carboxílicos que podrán ser aprovechados por los microorganismos como su fuente de carbono [10], [52], [50].

Tabla 14.

Sistemas de degradación

Sistema de degradación	Parámetro	Valor / Rango	Tiempo	Resultados	Ref
Compostaje	Nutrientes	Cascarilla de arroz, aserrín, Seudotallo de plátano, Restos de hortalizas	N/A	Durante el proceso de compostaje se presentan 3 fases; mesófila, termófila y enfriamiento donde la temperatura varia en el rango de 20-70°, hasta llegar a un valor máximo de 70°C; temperatura en la que los patógenos son eliminados.	[65]
	Temperatura	20-70 °C			
	pH	7,5 >			
	Humedad	50-60%			
	Nutrientes	Césped	9 meses	La mayoría de los compostadores proporcionaron reducciones de materia ligeramente superiores al 75 %, mientras que en invierno se alcanzó un 70 %.	[64]
	Temperatura	10-60 °C			
	Humedad	40-60%			

Tabla 14. Continuación

Rellenos sanitarios	Temperatura	28-32°C	N/A	Al evaluar 20 muestras de residuos sólidos plásticos del botadero de Cancharani ubicado en Perú se evidenció el crecimiento de hongos filamentosos como <i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus flavus</i> , <i>Aspergillus fumigatus</i> , <i>Fusarium spp</i> , <i>Mucor spp</i> , en donde <i>Aspergillus niger</i> presentó una tasa de crecimiento de 46,67%.	[55]
	pH	8±1			
	Temperatura	30°C	126 días	Se tomaron muestras de suelo del vertedero de Teheran en Irán, en donde se han enterrado desechos de PE. Se aíslan 144 cepas, las cuales son evaluadas en agar sólido mineral sintético. Solo los microorganismos <i>Aspergillus niger</i> y <i>Lysinibacillus xylanilyticus</i> presentaron un crecimiento significativo frente al LDPE	[61]
	pH	7.5			
	Humedad	50%			
	Temperatura	6-47°C	N/A	El software CLIMEX, estima los sectores en donde se podrá disponer de residuos sólidos que contengan LDPE dentro de 90 años. Donde <i>Aspergillus niger</i> crecerá satisfactoriamente	[68]
	Humedad	85-100%			

Tabla 14. Continuación

Biorreactores	Temperatura	58±2 °C	180 días	La degradación de polietileno convencional y polietileno oxodegradable arrojó que ninguna de las muestras libera metales pesados ni metabolitos tóxicos que afecta la tasa de germinación de las plantas. Se generó una pérdida de peso del LDPE convencional del 13.48%, y LDPE oxodegradable de 25.48%	[26]
	Humedad	55-60%			

Nota. En esta tabla se exhiben los parámetros de temperatura, nutrientes, humedad y pH implementados por los autores.

En los sistemas de biodegradación, el compostaje es comprendido como una degradación termofílica aerobia, ejecutada por una colonia autónoma o mixta de varios microorganismos, el cual, se ve influenciado por las condiciones meteorológicas. En la degradación de LDPE en el sistema de compostaje no se presentan metales pesados. Por lo tanto, se puede implementar dicho compost en cultivos agrícolas que no involucren productos comestibles [25], [26].

Los suelos propios de rellenos sanitarios son ricos en microbiota con un buen porcentaje de hongos, como: *Aspergillus niger*, *Aspergillus flavus*, y bacterias: *Pseudomonas*, *Lysinibacillus xylanilyticus*. Teniendo en cuenta esto, a futuro se pueden gestionar planes para la localización de un relleno sanitario en donde se degrade plástico [27], [23], [31].

Los biorreactores se implementan en ubicaciones en las que se recibe una gran cantidad de residuos. Una de las ventajas de este sistema, es que la biodegradación permite obtener compost maduro en poco tiempo y a bajos costos, esto se debe al control de las variables involucradas en el proceso, temperatura, humedad, aireación y pH; garantizando un medio adecuado para el desarrollo de poblaciones microbianas. Estos microorganismos se encargan de transformar la materia orgánica

e inorgánica en un compost, que se puede implementar como fertilizante de plantas que no produzcan frutas o verduras [26].

4. VARIABLES DE PROCESO PARA LA BIODEGRADACIÓN DE PELÍCULAS DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD

En el presente apartado se da a conocer el diseño de experimentos implementado, la selección de variables y la descripción de los montajes dispuestos en el proceso de biodegradación, que contó con un desarrollo experimental de 21 días en los laboratorios de la Fundación Universidad América y 30 días de forma casera.

4.1 Diseño de la experimentación

Para el desarrollo de la investigación, se seleccionó un diseño de experimentos factorial 2^2 con dos factores (pretratamiento y compostaje), cada uno de los cuales cuenta con 2 niveles (con y sin radiación UV; compostaje maduro con humus y compostaje fresco). Se realizó la manipulación de los factores controlables: pretratamiento y compostaje. Los factores dependientes presentados son: temperatura y humedad. En la Figura 29, se muestra la distribución de las unidades experimentales de compostaje que se establecieron para el desarrollo del estudio.

Figura 29.

Distribución de las unidades experimentales de compostaje



Nota. Las unidades experimentales empleadas se ubicaron en un cuarto oscuro.

4.1.1 Tamaño de la muestra

El representativo de la población tratada son láminas rectangulares de un empaque plástico comercial; bolsa calibre 1, de polietileno de baja densidad, con dimensiones de 7,5x13 cm.

4.1.2 Hipótesis y especificación de variables

4.1.2.i. Hipótesis. El planteamiento del diseño de experimentos factorial se da con dos variables, el tipo de compostaje y el pretratamiento. Se requieren de tres grupos de hipótesis (conformados por una hipótesis nula y una hipótesis alternativa), donde se evalúe a cada variable de forma independiente y la interacción entre las dos. Dichas combinaciones se muestran a continuación:

H_0 : el efecto de la variable compostaje no tendrá diferencia entre sí (A) = 0

H_A : el resultado de la prueba será diferente entre el compostaje empleado (A) \neq 0

H_0 : el efecto de pretratar con y sin luz UV es igual (B) = 0

H_A : el efecto de pretratar con y sin luz UV es diferente (B) \neq 0

H_0 : la combinación entre las variables compostaje y pretratamiento produce el mismo resultado (AB) = 0

H_A : la combinación de las variables compostaje y pretratamiento produce diferencias entre las múltiples combinaciones (AB) \neq 0

4.1.2.ii. Variables. El estudio del porcentaje de colonización del polímero fue cualitativo, determinando el crecimiento del microorganismo de manera visual. La variable de degradación cuantitativa de tipo numérica continua (con la posibilidad de presentar valores numéricos decimales); al definirse el grado de degradación, a través del pesaje de cada una de las láminas del material. Encontrándose:

- **Variables independientes:**

Compostaje con dos niveles (compostaje maduro con humus y compostaje fresco).

Pretratamiento con dos niveles (Radiación UV y sin radiación UV).

- **Variables dependientes:**

Temperatura

Humedad

- **Variable de respuesta:** Porcentaje de degradación del plástico sintético de polietileno de baja densidad.
- **Variables definidas como constantes al iniciar la experimentación:** pH de trabajo del microorganismo y peso del material.

4.1.3 Características del campo experimental

El área experimental presentó las siguientes características:

Forma de la compostera: Rectangular

Ancho del cajón: 20,1 cm

Longitud del cajón: 22 cm

Masa de los residuos sólidos: 609 g para las unidades experimentales con 25 ml de biomasa y 365 g para las unidades experimentales con 15ml de biomasa.

4.2 Caracterización de los materiales y equipos

En la Tabla 15 se presentan los materiales y equipos involucrados en el desarrollo experimental, aquellos equipos empleados en la inoculación del microorganismo *Aspergillus niger* y que permitieron monitorear las variables pH, temperatura y humedad del compostaje.

Tabla 15.




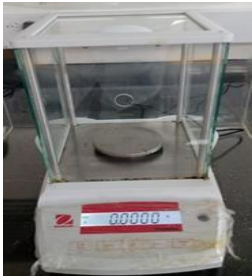
Materiales y equipos

Nombre	Descripción
<p data-bbox="357 398 711 472">Cabina de flujo laminar horizontal</p> 	<p data-bbox="839 398 1289 618">La cabina ofrece protección al producto, creando un entorno estéril en la zona de trabajo, ya que el aire atraviesa el filtro HEPA H14 con una eficiencia del 99,99%</p>
<p data-bbox="316 817 751 891">Lámpara germicida IP68 con ozono</p> 	<p data-bbox="839 817 1315 1003">Hecha de cuarzo, con una longitud de onda de 254nm. Usa luz ultravioleta para eliminar las bacterias, ácaros y moho. También purifica el aire.</p>
<p data-bbox="411 1131 655 1167">Agar sabouraud</p> 	<p data-bbox="839 1131 1315 1384">Permite el aislamiento y desarrollo de hongos, la peptona, tripteína y glucosa son los nutrientes esenciales para el crecimiento del microorganismo. Su pH ácido, inhibe a las bacterias.</p>
<p data-bbox="411 1592 655 1628">Caldo sabouraud</p> 	<p data-bbox="839 1592 1315 1845">Es un medio selectivo para cultivar levaduras, mohos y microorganismos acidúricos. Este medio de cultivo se diferencia del agar sabouraud debido a la adición de cloranfenicol (50 mg/l).</p>

Tabla 15. Continuación

<p style="text-align: center;">Autoclave</p>	<p>Esterilizador ideal para laboratorios, con válvula de seguridad de exceso de presión, manómetro y controlador de vapor (0-30 psi) y el rango de temperatura de 212-274°F.</p>
	
<p style="text-align: center;">Incu-Shaker mini</p>	<p>Pequeña incubadora con agitación para soluciones y medios de cultivo en condiciones de temperatura controlada.</p>
	
<p style="text-align: center;">Incubadora Xylem - WTW TS 606-G/2- i</p>	<p>Incubadora completamente aislada, controla la temperatura interna a través de un sensor. La temperatura se puede configurar en el rango de 10- 40°C y el ventilador de recirculación proporciona una temperatura uniforme.</p>
	
<p style="text-align: center;">Horno WYC Blinder</p>	<p>La cámara interna no tiene bordes, ni bastidor para bandejas, es fácil y cómodo de limpiar. El equipo está especializado para trabajar con cultivos de células.</p>
	

Tabla 15. Continuación

<p>pH metro Apera PH700</p>	<p>El equipo presenta un chip microprocesador que habilita funciones inteligentes y automáticas como calibración, compensación automática de temperatura en un rango entre 32-212°F y un rango de pH va de 0-14.</p>
	<p>Higrómetro</p>
	<p>Mini medidor de temperatura y humedad con una precisión de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, un rango de temperatura -50-70°C, humedad relativa de 10-99%. La resolución para la humedad relativa es del 1%.</p>
<p>Lactofenol azul</p>	<p>Solución de tinción lista para usar en hongos. El microorganismo se tiñe en un solo paso de un color azul oscuro.</p>
	<p>Balanza Ohaus PA224</p>
	<p>La balanza tiene tara automática, menú de reinicio una sensibilidad de 0,0001g, y una capacidad máxima de 220g. Perfecta para tener una medida precisa en los laboratorios.</p>

Nota. Es esta tabla se presentan y describen los equipos involucrados en la fase experimental.

4.3 Descripción de los procesos realizados en el estudio

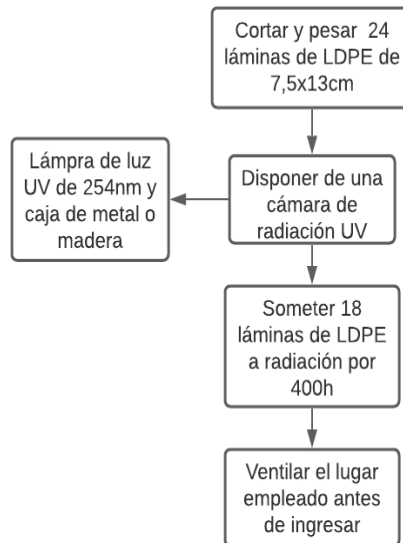
Teniendo en cuenta el diseño de experimentos y los equipos anteriormente descritos, a continuación, se especifica la metodología experimental realizada para dar cuenta de las variables de proceso implicadas en la biodegradación de películas de polietileno de baja densidad.

4.3.1 *Pretratamiento de polietileno de baja densidad*

24 láminas de polietileno de baja densidad fueron cortadas (de acuerdo a las dimensiones mencionadas en el apartado 4.1.1) y pesadas, de las cuales, 18 posteriormente se pretrataron en una cámara de radiación UV construida con una lámpara de luz ultravioleta de 254 nm y una caja de madera o de metal a fin de prevenir la exposición directa de esta luz a los ojos y piel. Dentro de las cámaras, las láminas del material se agruparon de tal forma que no se tocaran entre sí y todas lograran ser irradiadas por la lámpara. Considerando la bibliografía, el pretratamiento tomó un tiempo de 400h sin ciclos oscuros, iniciando el día 25 de septiembre a las 4:40 pm y finalizando el día 12 de octubre a las 8:42am, momento en que se efectúa la ventilación de la habitación en la que se estaba desarrollando el pretratamiento con la apertura de puertas y ventanas por un tiempo mínimo de 15 min antes de ingresar.

Figura 30.

Pretratamiento del polietileno de baja densidad



Nota: Pretratamiento con radiación UV efectuado a las láminas de LDPE.

4.3.2 Construcción de los cajones compostadores

Debido a que la variable independiente es el compostaje, se manejaron dos tipos: un compostaje fresco y uno maduro con humus. Luego, se procedió a instalar las diez unidades experimentales y dos blancos extra conformados por el compostaje (fresco y maduro con humus) y el material no irradiado, cuya finalidad es servir de punto de comparación respecto a los demás montajes. Los compostajes empleados para el desarrollo experimental poseen similitud en su preparación y características.

4.3.2.i. Compostaje maduro (humus). Este tipo de compostaje comenzó a elaborarse en marzo de 2019, con residuos orgánicos, tales como: cáscaras de plátano, papa, zanahoria, lechuga, tomate, lulo, mango, etc., provenientes de una cocina. También se emplearon trozos de cartón, hojas de papel sin tintas, hojas y ramas de árboles secos, aserrín, cascarilla de arroz y tierra negra.

La disposición de estos materiales se hizo en un costal blanco, por niveles en forma de lasagna. En el primer nivel se colocaron materiales por capas: hojas secas y ramas, se agregó tierra negra; posteriormente, se pusieron capas de los residuos orgánicos y la cascarilla de arroz, volviendo a repetir. A esta pila casera se adicionan capas y residuos cada tres días, aplicando volteos cada quince días.

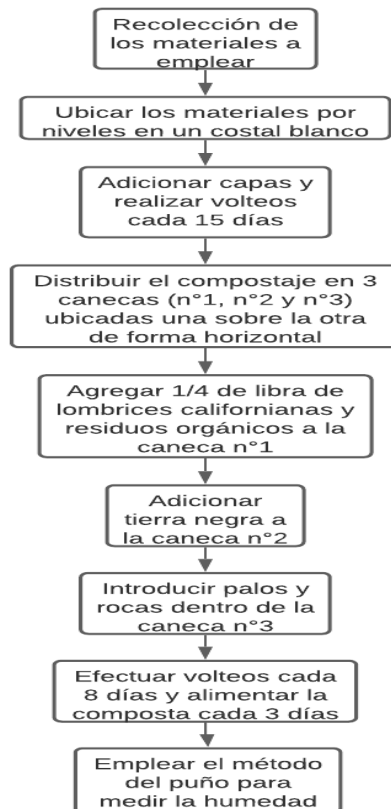
Para acelerar el proceso de compostado, en junio de 2019 el compostaje del costal fue distribuido en tres canecas dispuestas de forma vertical. En la caneca n°1 se agregó 1/4 de libra de lombrices rojas californianas, residuos orgánicos de cocina picados y tierra negra. En la caneca n°2 se puso una gran parte del compostaje iniciado en marzo, adicionando más tierra negra, para que terminara su proceso de descomposición y fuera utilizada como un receptor del humus que las lombrices estaban elaborando en la caneca n°1. Las lombrices se encargaron de descomponer la materia orgánica más rápido contenida en el compostaje.

La caneca n°3 se utilizó como un contenedor de lixiviados, derivados de los residuos orgánicos que se descomponían. Dentro de ella, se introdujeron palos y rocas, con dos finalidades: sostener las canecas n°1 y n°2, para no cerrar la circulación de aire por la caneca n°3 (la cual reservaba los lixiviados); evitando de este modo la acumulación de gases y la pudrición del líquido residual. La producción del humus se generó cuando las lombrices circularon entre la caneca n°1 y n°2, alimentándose del material orgánico. Dicho proceso aseguraba la localización del humus en la caneca n°2.

Los volteos se hacían cada ocho días y la alimentación de la composta cada tres días. Se evaluó la cantidad de humedad con el método del puño, buscando un balance entre la descomposición de los residuos, previniendo la aparición de comunidades microbianas ajenas al suelo (contaminación ambiental) y controlando el ambiente de supervivencia de las lombrices descomponedoras. El humus obtenido paulatinamente, fue empleado en el enriquecimiento de suelos de una huerta casera, y se reservó otra parte, para ser utilizado en la presente investigación.

Figura 31.

Consolidado proceso compostaje maduro con humus



Nota. Procedimiento para el desarrollo del compostaje maduro con humus.

4.3.2.ii. Compostaje fresco. El 25 de octubre de 2020 se inicia el desarrollo del compostaje fresco, con la recolección y trituración de residuos orgánicos de hortalizas (cáscara de zanahoria, papa y arveja, lechuga, espinaca, repollo, acelga y hojas de coliflor); plantas secas (tallos y hojas de Martín Galvis, hoja de pan, romero, arrayán, eucalipto y pino) para procesarlos en pequeños trozos; también se dispone de cartón, al cual se le retira la cinta adhesiva y la capa superficial con tinta impresa, a fin de evitar la contaminación del compostaje. Entre otros materiales empleados, se encuentra el activador que, en este caso, es la tierra negra junto con la cascarilla de arroz.

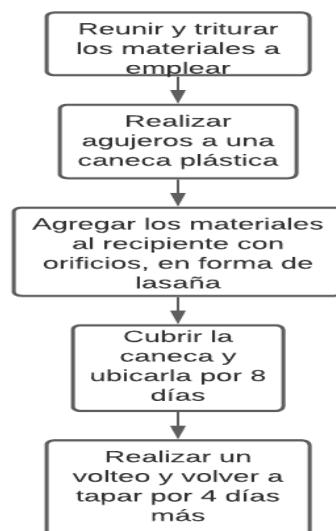
Al mismo tiempo, se acondiciona una caneca plástica con orificios alrededor y en la base, para propiciar el proceso de oxigenación y evitar la acumulación de lixiviados.

Dentro del recipiente agujereado se agregaron los materiales de la siguiente manera: una capa gruesa de los componentes secos (cartón y plantas secas mezclados), seguido de los residuos orgánicos picados, otra capa de material seco y finalmente, el activador, cuya función es evitar la propagación de malos olores, y agilizar el proceso de descomposición.

La caneca se cubre con una tapa, y se ubica en un lugar que evita el contacto directo con el suelo, y con los rayos del sol. Ocho días después, se destapa el recipiente, y se realiza el volteo del material, evidenciando la producción de un compostaje óptimo, con el olor característico a tierra y sin lixiviados. Nuevamente se tapa, permitiendo la continuación del proceso de descomposición por cuatro días más.

Figura 32.

Consolidado proceso compostaje fresco



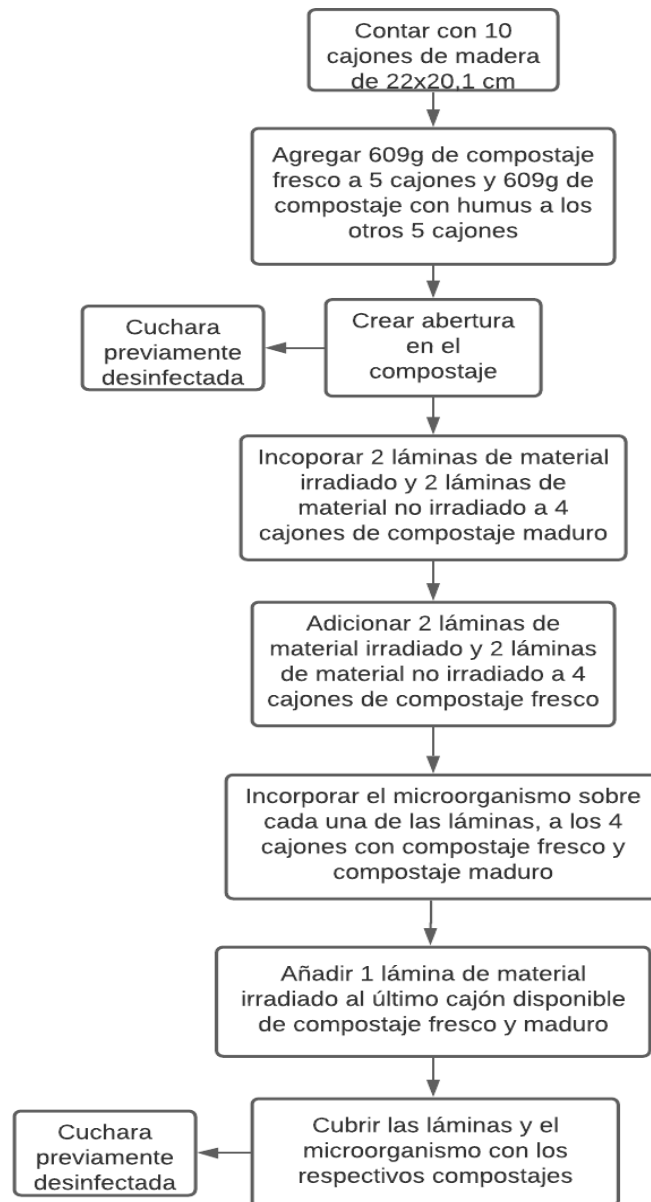
Nota. Procedimiento para el desarrollo del compostaje fresco.

4.3.2.iii. Cajón compostador. En la construcción del cajón compostador, se emplearon diez cajas de madera con las medidas definidas en el apartado “Características del campo experimental”, cinco de las cuales fueron suministradas con 609g de compostaje fresco, mientras que las otras cinco fueron preparadas con 609g de compostaje maduro, de tal forma que, dentro de la caja de madera se dispusiera en capas de la siguiente manera: una capa del respectivo compostaje, sobre ella, el material LDPE (irradiado con luz UV o sin irradiar), luego, en la parte de arriba se ubicó el microorganismo (*Aspergillus niger*), y por último, otra capa de compostaje.

La distribución de estas cajas de madera, -que conforman las unidades experimentales-, se efectuó en cada tipo de compostaje, utilizando dos unidades experimentales con el material irradiado en la luz UV y el microorganismo; dos unidades experimentales con el material sin irradiar y el microorganismo, y un blanco, conformado por el compostaje y el material irradiado.

Figura 33.

Construcción del silo compostador



Nota. En el proceso de elaboración del silo compostador se hace uso de las láminas del material con pretratamiento y sin, los compostajes, el microorganismo y los cajones de madera.

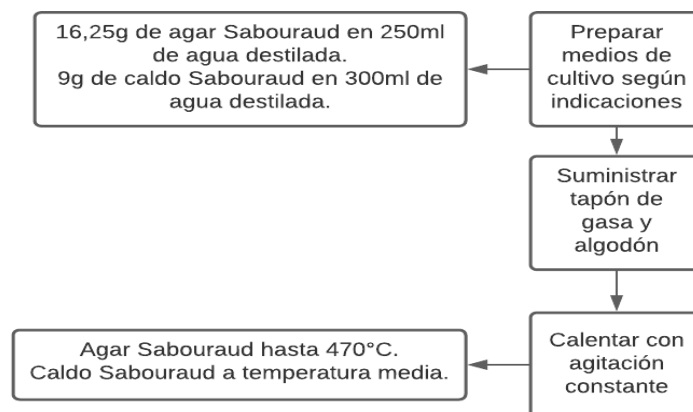
4.3.3 Inoculación del medio de cultivo

Para ejecutar este proceso, se hace uso de una cepa de *Aspergillus niger* conservada en caldo de cultivo Sabouraud y glicerol al 25%, en el laboratorio de investigación de la Fundación Universidad de América.

4.3.3.i. Elaboración del medio de cultivo. La preparación de los medios de cultivo (agar y caldo Sabouraud), es efectuada con base en las indicaciones propuestas por el fabricante, adicionando 16,25 g de Agar Sabouraud en 250ml de agua destilada, y 9 g de caldo glucosa Sabouraud a 300ml de agua destilada. Para activar la biomasa y obtener su gelatinización, se calienta hasta los 470°C con agitación constante, mientras que al caldo Sabouraud, se le aplica una elevación de temperatura, de tal modo que no se eleve al punto de ebullición. La salida de CO₂ es promovida mediante un tapón de gasa y algodón, que a su vez, limita la entrada de material particulado.

Figura 34.

Consolidado del procedimiento para la elaboración de los medios de cultivo



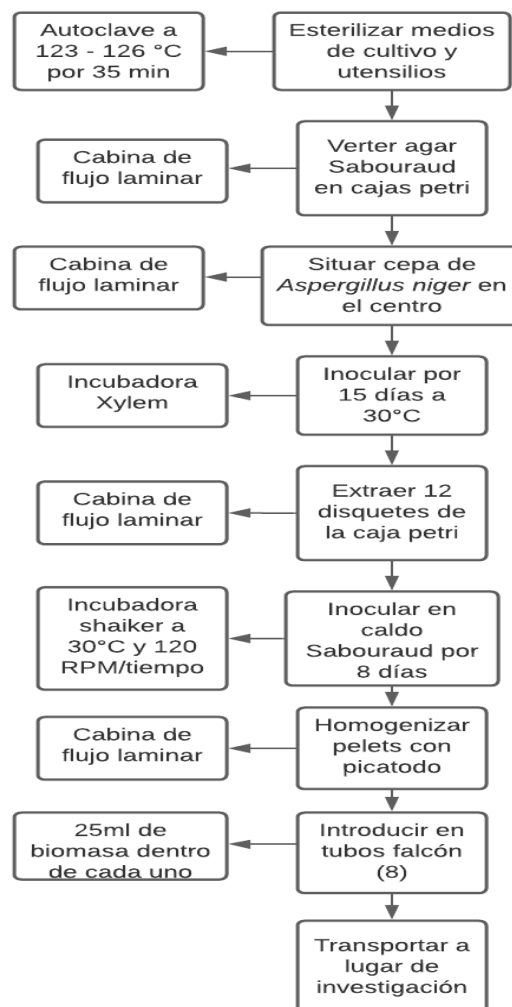
Nota. Elaboración de los medios de cultivo agar y caldo Sabouraud

Para la inoculación de los microorganismos con cultivo en superficie, son esterilizados en el autoclave el medio a emplear y los demás utensilios (cajas petri, Erlenmeyers y asas), dentro de un rango de 123-126°C por 35 min. Continuando con el proceso, se realiza el vertido del agar Sabouraud, en las cajas petri haciendo uso de la cabina de flujo laminar. Luego se toma un disco agar de *Aspergillus niger* (previamente conservado) y se dispone en el centro del medio de cultivo, asegurando el crecimiento de forma axial, durante un periodo de 15 días a 30°C en la incubadora Xylem.

4.3.3.ii. Producción del inóculo. Posterior a la activación de la cepa, se toman 12 discos agar (de aproximadamente 6,65 mm de diámetro) y se inoculan en 75 ml de caldo Sabouraud en Erlenmeyers de 100 ml para un total de 6 unidades experimentales. Estos fueron incubados durante 8 días a 30°C en una incubadora shaker a 120 RPM. Posteriormente, los pelets obtenidos del anterior procedimiento, son homogenizados en un picatodo y colocados en 8 tubos falcón (25 ml de biomasa dentro de cada uno), con el propósito de ser transportados hacia los lugares donde se desarrolló la investigación, para ser acoplados con los compostajes.

Figura 35.

Consolidado de la activación y preparación del inóculo



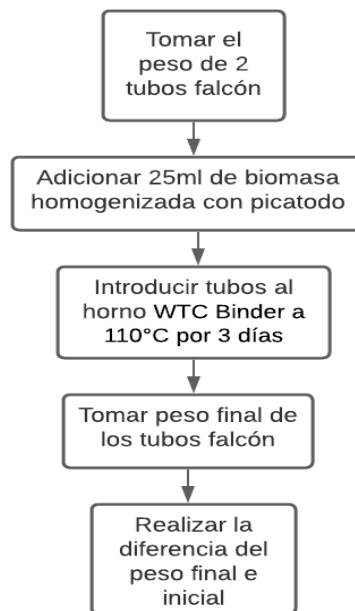
Nota. Procedimiento para la activación y preparación del inóculo con *Aspergillus niger*.

4.4 Prueba de peso seco

La evaluación de la biomasa en un bioproceso, permite determinar su eficiencia. Es por ello que, para la presente investigación, se cuantifica el peso seco recuperado por 25ml de biomasa de la siguiente manera: se inicia con la toma del peso de 2 tubos falcón y se adicionan 25ml de biomasa recuperada del proceso del numeral 4.3.3. Posteriormente, dichos tubos son introducidos en el horno WTC Binder a 110°C por 3 días hasta hallar peso constante. El peso de la biomasa corresponde a la diferencia entre el peso final del tubo falcón y el peso inicial.

Figura 36.

Evaluación del peso seco recuperado



Nota. La prueba de peso seco se desarrolló con la ayuda de dos tubos falcón.

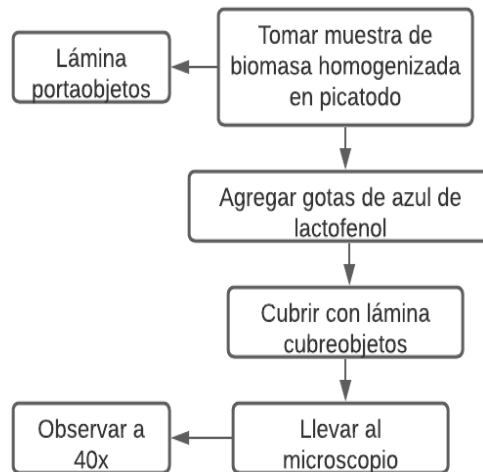
4.5 Prueba de pureza

La determinación de pureza en inóculos con medios no selectivos como el Agar Sabouraud, puede realizarse por microscopía óptica del cultivo teñido, con el método de coloración de Gram.

Para evidenciar la morfología propia de *Aspergillus niger*, se realizó un montaje en fresco. En él se tomó una muestra extraída del cultivo obtenido en el numeral 4.3.3, se le agregó gotas de azul de lactofenol sobre una lámina portaobjetos, la cual fue cubierta con la lámina cubreobjetos, y luego llevada al microscopio para observar a 40x.

Figura 37.

Determinación de pureza en inóculos



Nota. La prueba de pureza se efectuó mediante microscopía óptica.

4.6 Porcentaje de degradación y tratamiento de muestras

El cálculo del porcentaje de degradación se realizó teniendo en cuenta el dato del peso inicial tomado en el numeral 4.3.1, a su vez, se debe contar con el peso de las láminas luego de ser sometidas al compostaje. Para ello, las láminas se extrajeron del compostaje, se lavaron con agua destilada y se secaron, luego se tomó el peso final y mediante la Ecuación 2 mostrada a continuación, se calculó el porcentaje de degradación.

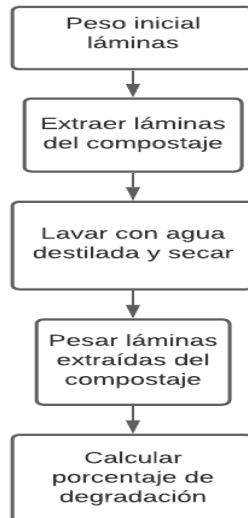
Ecuación 2.

Porcentaje de degradación

$$\% \text{ Degradación} = \frac{P_F - P_i}{P_i} * 100$$

Figura 38.

Determinación porcentaje de degradación



Nota. La determinación del porcentaje de degradación requiere de un previo lavado y secado de las láminas.

4.7 Análisis y resultados

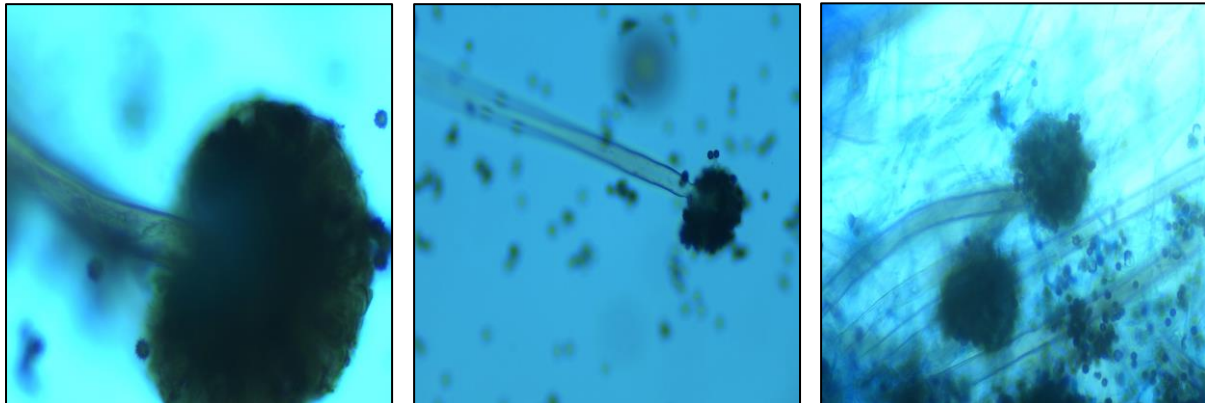
Los resultados de las valoraciones cualitativas y cuantitativas, obtenidas del proceso de biodegradación de LDPE efectuado durante 30 días, están determinados por el cálculo del porcentaje de biodegradación (pérdida de peso), y monitoreo de las variables pH, humedad y temperatura, haciendo uso de gráficas, tablas resumen, y ecuaciones, que permiten el adecuado desarrollo del estudio.

4.7.1 Pureza

Como parte de la determinación de la pureza de la cepa *Aspergillus niger* se realizó un montaje en fresco (numeral 4.5) en el que se evidencia las características morfológicas (microscópicas) propias de la especie (Figura 39) con cabezas conidiales globosas, conidios de bordes irregulares oscuros, hifas y conidióforos.

Figura 39.

Morfología *Aspergillus niger*



Cabezas conidiales globosas

Conidios irregulares

Hifas y conidióforos

Nota. En las imágenes se logra presenciar la morfología propia de *Aspergillus niger*.

En el Anexo 2, se encuentra la caracterización del microorganismo mediante revisiones bibliográficas.

4.7.2 Peso seco

Conforme el numeral 4.4, luego de someter los tubos a secado en el horno, la diferencia entre el peso final e inicial, corresponde a los gramos de biomasa obtenidos, se logra cuantificar un valor de 0,2959 g de peso seco recuperados de 25 ml de biomasa para la réplica 1, y 0,361g para la réplica 2. Cabe destacar que en el peso determinado se incluye material orgánico adsorbido y material inerte, así como la posibilidad de absorber humedad del medio al momento del pesado.

Tabla 16.

Determinación del peso seco

	Tubo falcón 1	Tubo falcón 2
Pi (g)	10,4695	10,6676
Pf (g)	10,7654	11,0286
Peso seco (g)	0,2959	0,361
Media (g)	0,32845	

Nota. Esta tabla muestra el peso seco recuperado de 2 tubos falcón con 25 ml de biomasa.

4.7.3 Pretratamiento con radiación UV

La selección de la lámpara de radiación UV se realizó con base en el trabajo de Z. Montazer, M. B. Habibi Najafi, M. Mohebbi, y A. Oromiehei, donde se implementó una lámpara de radiación UV de 245 nm y se reportó un ICO de 52,8% en tan solo 30 días; valor con relevancia para la experimentación, ya que el ICO representa los sustratos que serán aprovechados por el microorganismo. El tiempo de exposición fue seleccionado considerando a S. Selke, R. Auras, T. A. Nguyen, E. Castro Aguirre, R. Cheruvathur, y Y. Liu, investigación en la que el LDPE fue expuesto a radiación por 400h LDPE y presentó un aumento en la elongación hasta el rompimiento de $7,0 \pm 2,6\%$ del polímero.

4.7.4 Hallazgos y comparaciones entre tratamientos

Se realizó la triangulación de datos con el tratamiento de referencias similares a los procedimientos desarrollados en esta investigación, con el fin de contrastar los resultados alcanzados y ampliar los aportes de las investigaciones relacionadas con compostajes de polímeros en tiempos estimados de un mes.

Tabla 17.

Compendio de investigaciones relacionadas al compostaje

Título	Autores y año	Condiciones	Resultados
Biodegradation of plastic compost bags under controlled soil conditions	Yüksel Orhan, ^a Jasna Hrenović, ^b and Hanife Büyükgüngöra (2004)	<ul style="list-style-type: none">- Humedad: 50-65%- pH: 3,5-4,5- Tamaño de lámina: 2,54 x 15,24cm	El HDPE y el LDPE mostraron una fase de retraso de 4 semanas, tras lo cual se observó una ligera pérdida de peso de 1,3 y 2,1%, respectivamente.

Tabla 17. Continuación

<p>Biodegradabilidad de Artículos Desechables en un Sistema de Composta con Lombriz</p>	<p>Mariana Ruiz, Karla Pastor y Adriana Acevedo (2013)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Contenedor de polipropileno de 520 mm x 250 mm. - Tiempo: 30 días. - 1.3 kg de composta madura; 16g y 32g de lombriz. - Humedad inicial: 80%. - 8 gramos de material a degradar de 10mm, 5mm y 2mm. 	<p>Pérdidas de masa del PLA: 0% y 15%. Alteración en la forma de 14% y 37%. Degradación inicial dada la deformación que se presentó en el material.</p>
<p>Estudio de factibilidad de biodegradación de plásticos mediante composteo</p>	<p>María Rabell, Alethia Vázquez, Rosa Espinosa, Margarita Beltrán, Miriam Osada, Jorge González (2011)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Reactores de 200L. - Mezcla general: 1100L (50% RSO, 25% mulch y 25% composta madura). - PEBD: 110 tiras de 30 x 5 cm y 3 tiras de 100 x 30 cm. - OXO-PEBD sin oxidar y oxidado previamente. 	<p>El oxoplástico oxidado por radiación presentaba evidencias de degradación Temperaturas: 50 y 55 °C. OXO-PEBD irradiado: tonalidad amarillenta, opacidad y fragmentación a los 11 días de composteo.</p>

Nota. Esta tabla resume investigaciones relacionada con el compostaje fresco y maduro.

4.7.5 Compostaje fresco

El hongo *Aspergillus niger* colonizó algunos compuestos del compostaje como las hojas de Martin Galvis, las cuales otorgan celulosa y almidón (Figura 40). Se evidencia este comportamiento en los montajes n°1 (compostaje+lámina

irradiada+microorganismo) y n°3 (compostaje+lámina no irradiada+microorganismo). En la Figura 41 se ilustra la colonización del hongo en el montaje n°1 (lámina 3).

Figura 40.

Colonización de Aspergillus niger



Nota. Presencia de *Aspergillus niger* en el material vegetal del compostaje fresco.

Figura 41.

Aspergillus niger en lámina de LDPE irradiada

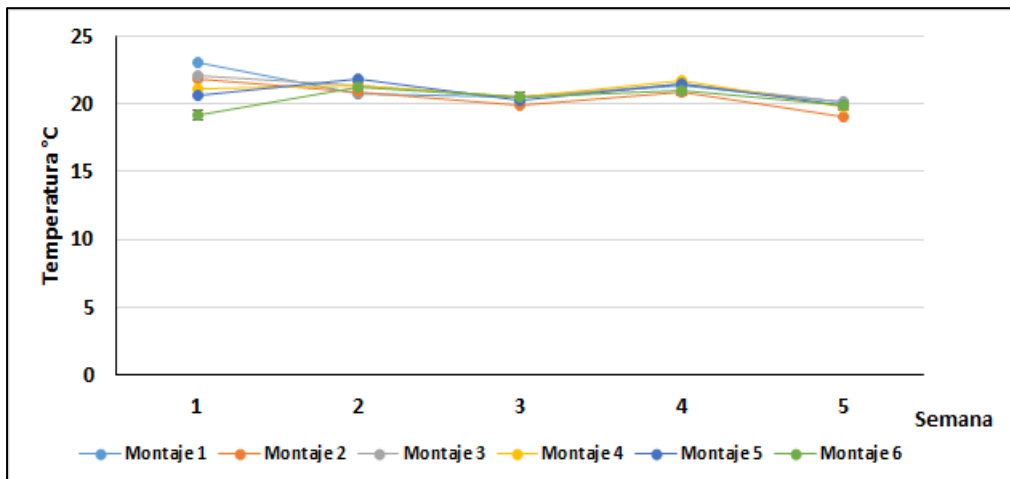


Nota. Colonización de *Aspergillus niger* en lámina número 3 involucrada en la condición experimental 1.

4.7.5.i. Temperatura. este factor se monitoreo con un hidrómetro desde la semana 0 hasta la semana 4, en la semana 4 varió entre (21,5-23,9) °C (Anexo 3), considerando lo dicho por V. C. Gonzáles, se favorece el crecimiento del microorganismo en la lámina de LDPE a temperaturas de 20 y 30 °C.

Figura 42.

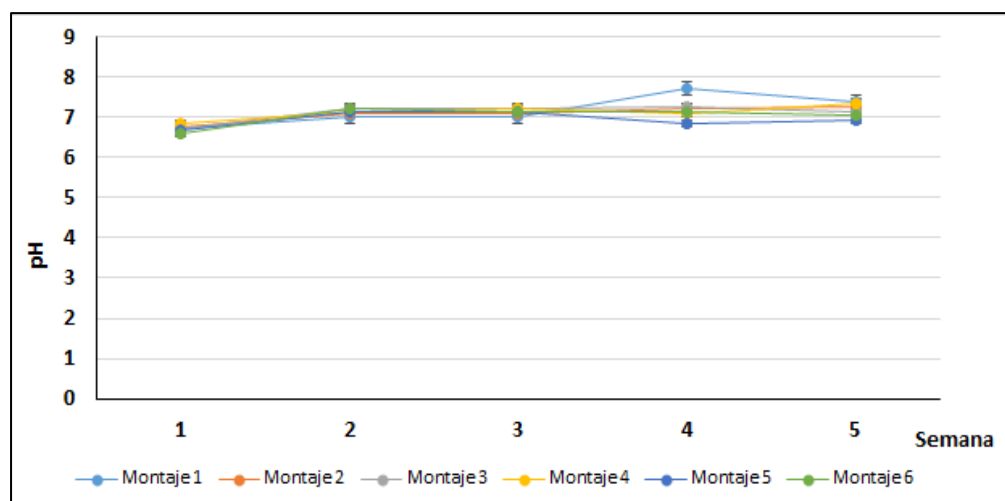
Temperatura promedio del proceso de biodegradación en compostaje fresco por cada montaje.



4.7.5.ii. pH. esta variable se monitoreo cada 8 días, el valor de pH inicial para los montajes con compostaje fresco fue de 6,70 en la semana 0 (Anexo 3), y aumentó hasta que de la semana 3 a la 5, presentó valores cercanos a la neutralidad (7,07 - 7,71). Esto se atribuye al consumo de los ácidos orgánicos por parte de los microorganismos. Según A. Bohórquez un valor de pH por encima del 7,5 es un buen indicador de la descomposición de residuos sólidos [65].

Figura 43.

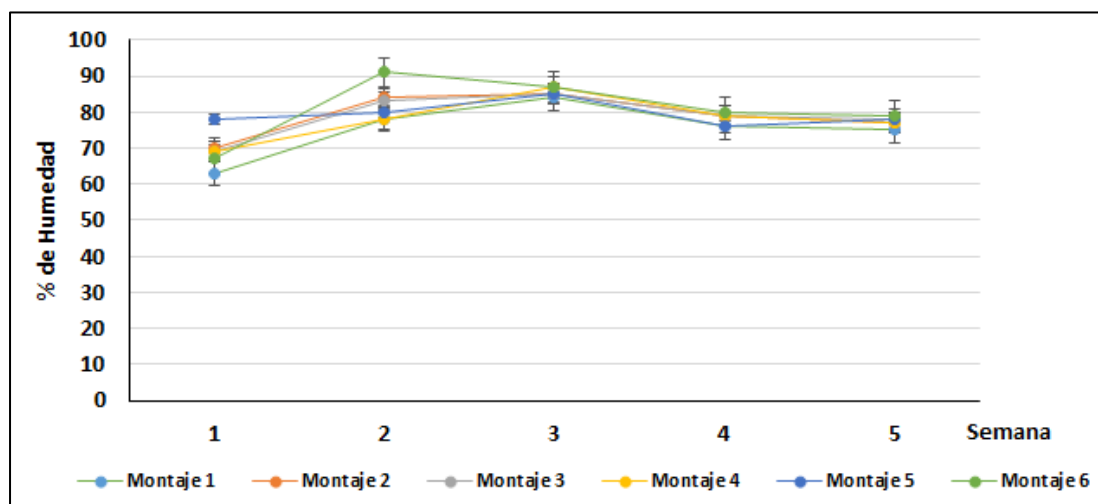
pH del proceso de biodegradación en compostaje fresco por cada montaje



4.7.5.iii. Humedad. la humedad tuvo una variación significativa en la semana 1 y 2 del 78-91% y 84-87% respectivamente (Anexo 3), esto se debe a que estas semanas fueron lluviosas y eso afectó el comportamiento de esta variable, según W. Bohórquez Santana, la humedad propicia para la actividad microbiana en el compostaje es de 40-60%, pero F. Shabani, L. Kumar, y A. Esmaeili afirma que *Aspergillus niger* puede colonizar y sobrevive en 70-90%.

Figura 44.

Humedad promedio del proceso de biodegradación en compostaje fresco por cada montaje



4.7.5.iv. Pérdida de peso. en la condición experimental 1 con UV y la condición experimental 2 sin UV, se evidencia una pérdida de peso del 4,84% y 1,34%, respectivamente, cabe aclarar que la lámina que posee mayor pérdida de peso fue aquella en la que se evidenció una mayor colonización por parte de la cepa. Y. Orhan, J. Hrenović, y H. Büyükgüngör reportaron una pérdida de peso del LDPE en un 2,1%, a las 4 semanas del proceso de compostaje.

4.7.6 Compostaje maduro

El compostaje maduro con *Aspergillus niger* presentó colonización desde la semana 1, certificando que las condiciones seleccionadas fueron las adecuadas para el desarrollo de la investigación. Se evidenció mayor colonización en el montaje 1 que contenía la lámina 5 previamente pretratada (Figura 45 y Figura 46), a su vez, se demostró mayor colonización del microorganismo en los compostajes con menor alcance de luz. Esta condición experimental inició el 5 de noviembre de 2020 y finalizó el 5 de diciembre de 2020. Se realizó monitoreo de las variables humedad y temperatura dos veces por semana y de pH cada 8 días.

Figura 45.

Compostaje maduro con humus



Nota. Colonización de *Aspergillus niger* en compostaje maduro con humus producido, con la presencia de una lombriz roja californiana.

Figura 46.

Colonización de Aspergillus niger en lámina pretratada con radiación UV

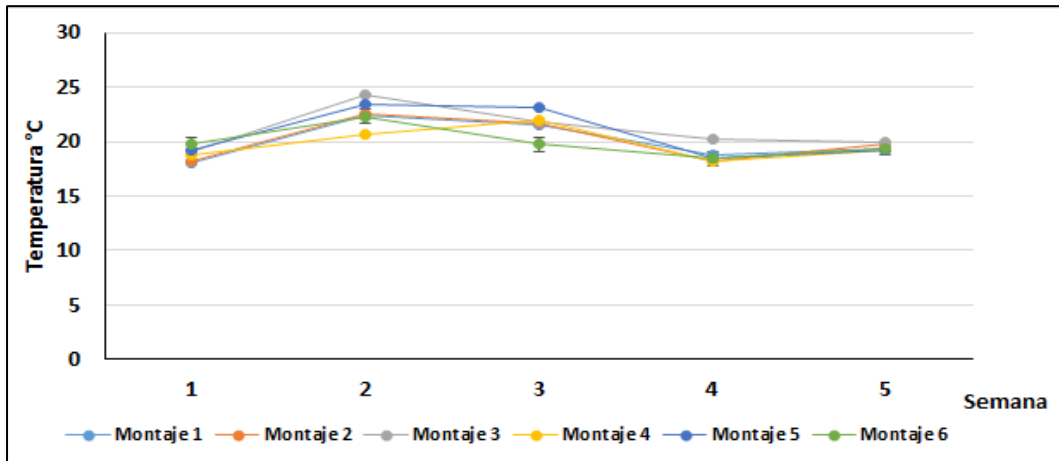


Nota. Colonización de *Aspergillus niger* en una lámina irradiada de LDPE presente en un compostaje maduro con humus.

4.7.6.i. Temperatura. Para el mes de estudio, la temperatura de las unidades experimentales se encontró en un rango de 17°C y 25,6°C. En las semanas 1 y 2 se presentó el mayor incremento, con temperaturas de 21°C, 21,4°C, 22,8°C y 25,6°C (Anexo 3); fenómeno ocasionado por la actividad del microorganismo que emplea fuentes de carbono y nitrógeno, generando calor. A su vez, dichas temperaturas son apropiadas para el proceso de colonización, evidenciándose comienzos de este proceso en el montaje 1.

Figura 47.

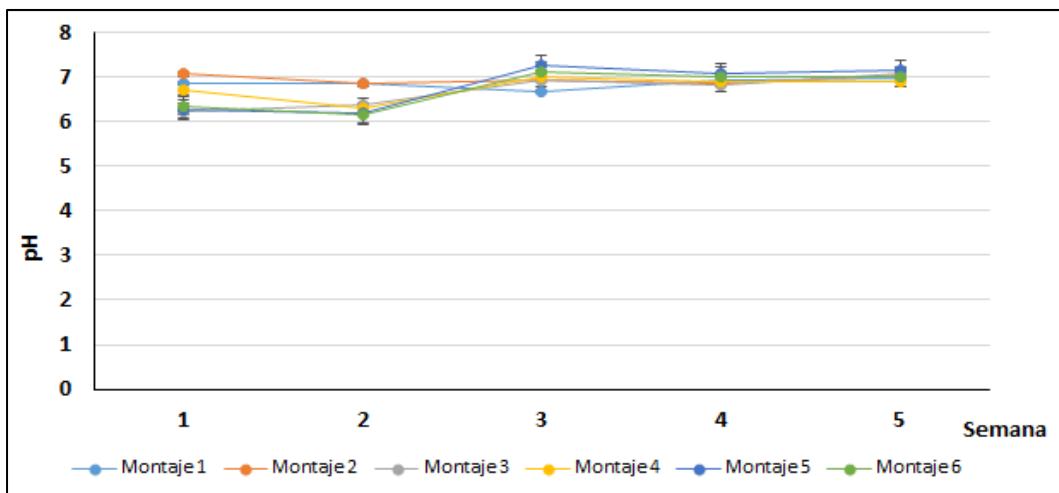
Temperatura promedio del proceso de biodegradación en compostaje maduro (humus) por cada montaje



4.7.6.ii. pH. Los valores de esta variable se presentaron entre 6,14 y 7,25, iniciando con valores aproximadamente ácidos (generados por la descomposición de azúcares) como el 6,24 reportado por el montaje 3 en la semana 0. Para la semana 1 y 2 en la que se presenta actividad fúngica con la colonización del microorganismo, estos valores continúan ácidos. Luego, la alcalinización del medio permite que el pH incremente su valor y se establezca en valores neutros.

Figura 48.

pH del proceso de biodegradación en compostaje maduro (humus) por cada montaje

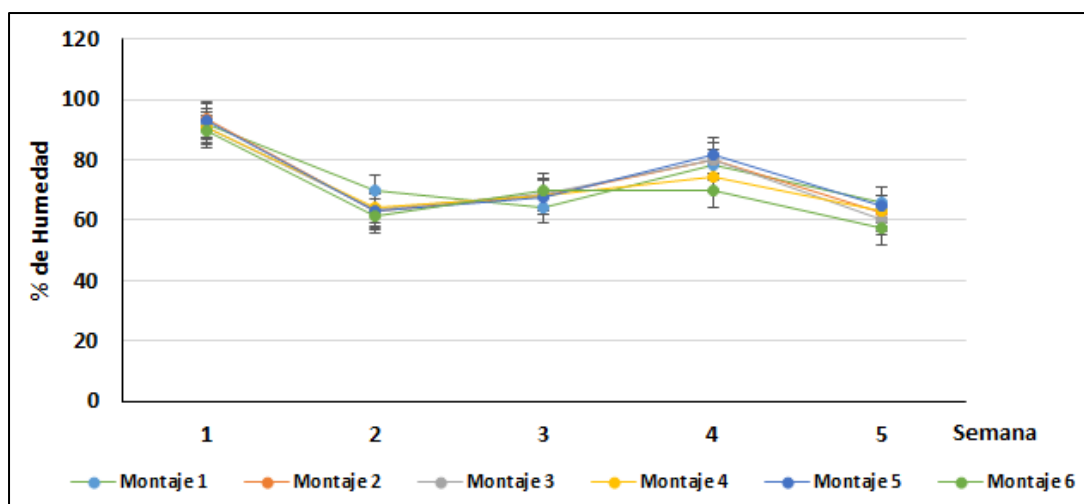


4.7.6.iii. Humedad. El comportamiento de esta variable inicia en 99% para todos los montajes, lo cual es indeseable, ya que puede favorecer la formación de núcleos que afectan el proceso de biodegradación aerobia [77], por ello, en la semana 1 no se adiciona agua y se espera que el valor de esta variable descienda con la interacción generada entre el microorganismo y el compostaje. La humedad depende del contenido inicial de agua en los sustratos y del proceso de biodegradación [77], sin embargo, se puede controlar. Por ello en las siguientes semanas se adiciona agua (inicialmente poca) para favorecer los procesos de colonización.

En la semana 2 se evidencian grumos de gran tamaño en la tierra, demostrando que la cantidad de agua suministrada no es suficiente, por lo que en las semanas 3 y 4 se emplea el método de la mano para determinar la cantidad de agua a suministrar, dicho método consiste en exprimir la tierra en la palma de la mano hasta el punto en que no fluya a través de ella, dando una estimación de la humedad correcta. De igual forma, se constata la influencia de la temperatura del medio ambiente en la humedad del compostaje reportada por el higrómetro, dado que en los días lluviosos (situados en la semana 3), la humedad reportada incrementa drásticamente, a pesar de visualizar la tierra seca y con grumos. La humedad de los montajes osciló entre los valores de 57% y 99%.

Figura 49.

Humedad promedio del proceso de biodegradación en compostaje maduro (humus) por cada montaje



4.7.6.iv. Pérdida de peso. Cabe mencionar que se resalta la importancia de una inoculación inicial con *Aspergillus niger* para acelerar el proceso de composteo con lombriz [76], es por ello que para la condición experimental 1 (con UV) se presenta un porcentaje de degradación de 3,63% y para la condición experimental 2 (sin UV), un porcentaje de 1,79%.

M. Ruiz, K. Pastor y A. Acevedo reportaron pérdidas de masa del PLA de 0% y 15% a condiciones donde los gramos de lombrices suministrados disminuyeron con el tiempo al igual que en el presente documento, pues en la semana 3 se reporta la muerte de la lombriz ubicada en el montaje 1. Por consiguiente, en el compostaje con lombriz, los artículos desechables pueden desequilibrar el sistema de lombricomposta al ser incorporados en él [76].

En el Anexo 3 se encuentra la recopilación de matrices de medición de variables de los compostajes fresco y maduro; en el Anexo 4 se pueden observar las láminas de LDPE antes y después de ser sometidas a la biodegradación.

4.7.7 Porcentaje de degradación

Los resultados del proceso de biodegradación para la condición experimental 1 (compostaje + lámina no irradiada + microorganismo), y la condición experimental 2 (compostaje + lámina irradiada + microorganismo) demuestran que no hubo diferencia entre los resultados arrojados por los compostajes, considerando que existía distinción entre los tiempos de elaboración de los compostajes y además, el compostaje maduro contenía humus de lombriz. Estos resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 18.*Resultados del proceso de biodegradación de LDPE*

Condición experimental 1					
Tipo de compostaje	Compostaje maduro			Compostaje fresco	
Sin UV	Número de replica	Replica 1	Replica 2	Replica 1	Replica 2
	Pi (g)	0,1847	0,1843	0,1874	0,1863
	Pf (g)	0,1831	0,1776	0,1848	0,1843
	% de degradación	0,8663	3,6354	1,3874	1,07354
	Media	2,2508		1,2305	
Condición experimental 2					
Con UV	Número de replica	Replica 1	Replica 2	Replica 1	Replica 2
	Pi (g)	0,1888	0,1839	0,1900	0,1816
	Pf (g)	0,1857	0,1806	0,1808	0,1801
	% de degradación	1,6578	1,7945	4,8421	0,8260
	Media	1,7261		2,8340	

Nota. Esta tabla muestra el comportamiento del peso de las láminas de LDPE sometidas a biodegradación en compostaje.

Es preciso mencionar que para las láminas pretratadas con radiación UV, se presumen cambios en la estructura de las moléculas del polímero, pero no pérdida de masa. La Tabla 19 resume los pesos del material luego de ser irradiado.

Tabla 19.*Peso de las láminas de LDPE luego de radiación UV*

Número de replica	Compostaje maduro		Compostaje fresco	
	Replica 1 (lámina 5)	Replica 2 (lámina 10)	Replica 1 (lámina 3)	Replica 2 (lámina 4)
Pi (g)	0,1888	0,1839	0,1900	0,1816
Pf (g)	0,1870	0,1786	0,1887	0,1799

Nota. Esta tabla muestra el peso de las láminas de LDPE luego de ser expuestas a luz UV por 400h.

Los valores obtenidos de porcentaje de degradación para las variables independientes: compostaje maduro con humus y compostaje fresco, y pretratamiento con radiación UV y sin radiación; permite la aplicación de un análisis de varianza (ANOVA) que compara las medias de las variables que dan respuesta a los diferentes niveles de los factores planteados en numeral 4.1.

Tabla 20.

Análisis de varianza (ANOVA)

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Muestra	0,581990654	1	0,581990654	0,194691963	0,681841437	7,708647422
Columnas	0,003834259	1	0,003834259	0,001282665	0,973146436	7,708647422
Interacción	2,264772717	1	2,264772717	0,757629082	0,43319092	7,708647422
Dentro del grupo	11,9571583	4	2,989289574			
Total	14,80775593	7				

Nota. El desarrollo del análisis de varianza determina que no existen diferencias significativas entre los tratamientos efectuados.

Demostrando así, que las hipótesis nulas se aprueban y no existen diferencias significativamente estadísticas entre el valor F y el valor de tabla (valor crítico). Por lo tanto, ninguna de las comparaciones efectuadas presenta diferencias:

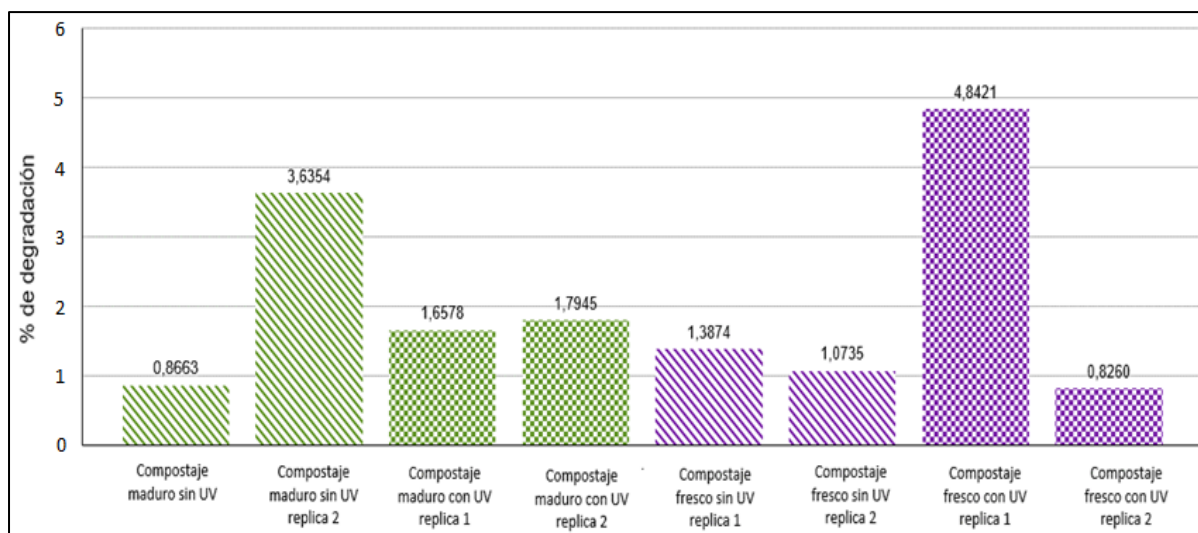
- Pretratamiento sin radiación UV y compostaje fresco.
- Pretratamiento sin radiación UV y compostaje maduro.
- Pretratamiento con radiación UV y compostaje fresco.
- Pretratamiento con radiación UV y compostaje maduro.

Dada la dispersión entre las réplicas de LDPE irradiadas con UV, se infiere que las muestras no se degradaron de forma homogénea debido a la distribución de estas dentro de la cámara de radiación. Así como, el error experimental propio del tratamiento de las muestras para ser posteriormente pesadas (numeral 4.6). Por lo que este método de evaluación no refleja los efectos reales de biodegradación.

La Figura 50 compara el comportamiento del proceso de biodegradación para las condiciones experimentales estudiadas, donde se evidencia que la condición experimental 1 en el compostaje fresco fue más pertinente, dado que la radiación UV fue efectiva para que los microorganismos pudieran consumir la cadena de material y así pudieran realizar el proceso de degradación.

Figura 50.

Porcentaje de degradación de LDPE



Nota. En la gráfica se evidencian los respectivos porcentajes de biodegradación para cada cajón compostador.

Teniendo en cuenta la información anterior, se evidencia que la cepa *Aspergillus niger* posee la capacidad de adherirse a la película de LDPE no irradiada y LDPE irradiada con UV, para consumirla como su fuente de carbono. Razón por la cual, se evaluó la diferencia de peso de las láminas antes y después del proceso de compostaje; si el proceso hubiera tardado más tiempo, el porcentaje de degradación hubiera sido mayor. A su vez, los factores de temperatura, humedad y pH favorecieron el crecimiento y colonización de la cepa. Cabe mencionar que la degradación del sustrato polimérico ocasionalmente logra el 100%, lo cual se debe a que una pequeña porción del polímero se incorpora en la biomasa microbiana, humus y residuos orgánicos.

5. CONCLUSIONES

A partir de la revisión bibliográfica sobre el uso de *Aspergillus niger* para la degradación de LDPE en los últimos 20 años, se puede concluir que se demuestra un aumento considerable en el número de estudios publicados acerca de la biodegradación de LDPE, como se expone en la Figura 35. Evidenciando la importancia de factores como condiciones ambientales, naturaleza del pretratamiento, las características del polímero y las variables experimentales durante el proceso de compostaje, que en conjunto influyen sobre la capacidad de colonización y porcentaje de degradación generado por el microorganismo.

Mediante la identificación de las propiedades del LDPE alteradas con el proceso de biodegradación, se determinó bibliográficamente que este material presenta disminución en su cristalinidad, resistencia mecánica, peso molecular, viscosidad, resistencia eléctrica (al estar vinculada con la masa molecular), y elongación a la ruptura (la cual debe disminuir 5% o menos). Igualmente, se establecen escisiones de la cadena principal, aumento en el índice de carbonilo y de fluidez. Así como reducción en la resistencia del material con una apariencia menos flexible, textura aspera y color más opaco, como se aprecia en las Figuras 41 y 46. Es preciso señalar que, el incremento en el peso molecular genera una disminución de la solubilidad, y con ello, la degradabilidad del polímero por ataque microbiano se ve afectada.

El estudio bibliométrico de las diferentes variables vinculadas al proceso de biodegradación, suministró las condiciones óptimas a emplear durante la degradación de polímeros. Siendo necesario un rango de temperatura de 6-47 °C, pH superior del 7,5, humedad de 70-90% y pretratamiento con radiación UV del LDPE para que se logre romper la cadena del polímero y se puedan generar grupos carbonilos, los cuales serán aprovechados por los microorganismos como su fuente de carbono con la asimilación del sustrato mediante la membrana celular y una posterior despolimerización por enzimas celulares.

El empleo de *Aspergillus niger* en compostaje y humus, resulta ser viable para la degradación de películas de LDPE. El compostaje fresco junto con el pretratamiento

del material por radiación UV fue el tratamiento más adecuado con un porcentaje de biodegradación de 4,8421% en 30 días, seguido del uso de compostaje maduro sin radiación UV con 3,6354%, luego un porcentaje de degradación de 1,7945% presentado por el compostaje maduro con radiación UV y, por último, el uso de compostaje fresco sin radiación UV con un 1,3874%.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Facultad de Derecho, “CASI EL 60 % DE LA BASURA DIARIA DE BOGOTÁ ES DESECHO PLÁSTICO”. Universidad De Los Andes Colombia, [En Línea]. Disponible: <https://derecho.uniandes.edu.co/es/informe-situacion-actual-de-los-plasticos-en-colombia> [Acceso: 30 de junio, 2020]
- [2] GREENPEACE, “La contaminación plástica pone en riesgo a los manglares”. Greenpeace Colombia. [En Línea]. Disponible: <https://www.greenpeace.org/colombia/noticia/issues/contaminacion/la-contaminacion-plastica-pone-en-riesgo-a-los-manglares/#:~:text=%E2%80%9CLa%20contaminaci%C3%B3n%20pl%C3%A1stica%20pone%20e n%20riesgo%20a%20los%20manglares%E2%80%9D,-por%20Prensa%20Colombia&t> [Acceso: julio 02, 2020]
- [3] N. R. Acuña Molina, Revisión Bibliografica Sobre Los Microorganismos Biodegradadores De Polietileno De Baja Densidad Y Sus Efectos En El Material, tesis pre. Facultad de Ciencias y Educación, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, 2017. Disponible en: <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/5608/Acu%F1aMolinaNelsonRicardo2017.pdf?sequence=1>
- [4] Z. Arbelí, “BIODEGRADACIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS PERSISTENTES (COP): I. EL CASO DE LOS BIFENILOS POLICLORADOS (PCB)”, Acta biol. Colomb., vol. 1, n° 1, pp. 57 - 88, ene. 2009. [Online]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/abc/v14n1/v14n1a04.pdf>
- [5] D. Torres Rodríguez, “El papel de los microorganismos en la biodegradación de compuestos tóxicos”, Rev. Ecosist., vol. 12, n° 2, may- ago, 2003. [Online]. Disponible en: <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/350>
- [6] M. Gilbert. (2017). *Brydson’s Plastics Materials*. (8va ed) [En línea]. Disponible en: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpBPME0001/viewerType:toc//root_slug:brydsons-plastics-materials/url_slug:relation-structure-electrical?issue_id=kpBPME0001

- [7] D. F. Cubillos G, Evaluación de las alternativas de adquisición de materia prima a nivel nacional e internacional para mejorar los costos de producción de Flexiempaques del Huila, tesis pos. Universidad de la Sabana, Bogotá, Colombia, 2014.
- [8] D. C. Moreno Guarín, “Plásticos i ecci (1),” 2016. [En línea]. <https://es.slideshare.net/DianaCatalinaMorenoG/plasticos-i-ecci-1> [Acceso: sep. 12, 2020].
- [9] A. Sánchez Sánchez, J. Moreno, M.ª Salazar, F. Sepúlveda, *Tecnologías II ESO*, Oxford University Press España, 2010.
- [10] S. Guzmán M, *Obtención de plástico biodegradable a partir de la nixtamalización del maíz*, tesis pre. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [11] I. E. Roca Girón, *Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad (pead)*, trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2005. [En línea]. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0639_Q.pdf
- [12] J. L. Jordan et al., "Mechanical Properties of Low Density Polyethylene", *Journal of Dynamic Behavior of Materials*. vol. 2, pp. 411-420, jul, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40870-016-0076-0> [Acceso: junio 24, 2020]
- [13] A. A. Shah, F. Hasan, A. Hameed, S. Ahmed, “Biological Degradation of Plastics: A Comprehensive Review”, *Biotechnology Advances*, vol.26, no. 3, pp. 246-265, 2008, doi: <https://doi:10.1016/j.biotechadv.2007.12.005> [Acceso: junio 20, 2020].
- [14] S. K. Kumar Kanchi, *Biodegradation of low-density polyethylene by fungi*, tesis doc. Faculty of Science, Engineering and Technology, Swinburne University of Technology, Melbourne, Australia, 2015.
- [15] F. Billmeyer. *Textbook of polymer science*, Tercera edición. Estados Unidos: John Wiley & Sons, 1984. [En línea]. Disponible en: <http://cryssmat.fq.edu.uy/ricardo/libro.pdf>
- [16] INVIMA, “PLAN NACIONAL SUBSECTORIAL DE VIGILANCIA Y CONTROL DE MIGRACIÓN ESPECÍFICA DE SUSTANCIAS QUÍMICAS EN ENVASES QUE ESTÁN EN CONTACTO CON ALIMENTOS Y BEBIDAS DE CONSUMO HUMANO”. INVIMA, [En Línea]. Disponible: <https://www.invima.gov.co/documents/20143/441038/Documento-tecnico-Programa-MOES-a%C3%B1o-2016-publicari.pdf/11d9b56f-68ef-587d-7cc0-8b4f54a39c0d> [Acceso: Nov. 15, 2020]

- [17] L. F. Coicue, C. C. Sepúlveda. *Polietileno de baja densidad como alternativa para mejorar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica densa en caliente MDC-19*, tesis pre. Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia, 2017.
- [18] C. V. Cupul, R. H. Cruz, A. Caballero, L. M. Rangel, "Propiedades de Mezclas Extrudidas a Base de Polietileno de Baja Densidad y Polianilina", *Información Tecnológica.*, vol. 19, n.º 2, pp. 69-79, 2008. [Online]. Disponible en: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v19n2/art09.pdf> [Acceso: septiembre 14, 2020].
- [19] D.C., Múnera Parra, *Degradación del polietileno de baja densidad por Aspergillus niger*, tesis pre. Facultad de ingeniería, Universidad De Los Andes, Bogotá, Colombia, 2014. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/flexpaper/handle/1992/16469/u686780.pdf?sequence=1&isAllowed=y#page=1>
- [20] L.M., Espinoza Arias, *Evaluación de la degradación de polietileno de baja densidad mediada por diferentes especies de hongos*, tesis pre. Colegio de ciencias e ingeniería, Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador, 2018. Disponible en: <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/7410/1/139174.pdf>
- [21] J. C., Cedeño Dominguez, J.G., Merino Cordero, *Valoración In vitro de la biodegradación de polietileno de baja densidad mediante hongos filamentosos aislados del relleno sanitario de pichacay*, tesis pre, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2020. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18821/1/UPS-CT008788.pdf>
- [22] A., Labeaga Viteri, *Polímeros biodegradables. Importancia y potenciales aplicaciones*, tesis pos. Facultad de ciencias, Universidad Nacional de Educación a Distancia, España, 2018. Disponible en: http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:master-Ciencias-CyTQ-Alabeaga/Labeaga_Viteri_Aitziber_TFM.pdf
- [23] S. C., Muñoz Inostroza, *Degradación de polímeros de interés industrial utilizando una mezcla de Pseudomonas aeruginosa, Cladosporium sp y Alternaria sp.*, tesis pre. Tecnología médica. Universidad Santo Tomás, Santiago, Chile, 2014. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Eugenio_Reyes/publication/290431329_Degradacion_de

[_Plasticos utilizando Bacterias y Hongos/links/5697acbd08ae34f3cf1f0a26/Degradacion-de-Plasticos-utilizando-Bacterias-y-Hongos.pdf](#)

- [24] B. Posada Bustamante, “La degradación de los plásticos”, Rev. Universidad Eafit., vol. 30 n° 94, pp. 67- 86, ago. 1994. [Online]. Disponible en:
<https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/1408>
[Acceso: junio 26, 2019].
- [25] M. Tolinski, “GLOBAL RESIN TRENDS 2015: AN EXPERT ROUNDTABLE” *society of plastic engineering*, p.48, enero, 2015, [En línea]
<http://read.nxtbook.com/wiley/plasticsengineering/january2015/index.html>
- [26] A.Vázquez *et al*, “Biodegradation and ecotoxicity of polyethylene films containing pro-oxidant additive”, *J Polym Environ*, vol. 24, pp.221–229, abril, 2016 doi: 10.1007/s10924-016-0765-8
[Acceso: septiembre 3, 2020]
- [27] F. Quiroz, F. Cadena, L. Sinche, I. Chango, y M. Aldás, “Estudio de la degradación en polímeros oxo-biodegradables,” *Rev. Politécnica*, 2009, [Online]. Disponible en:
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5537/1/Francisco-Quiroz.pdf%0A>
- [28] A. C. Santo Rosa, *Análisis y simulación numérica del proceso de degradación por hidrólisis de biopolímeros en aplicaciones biomédicas ,tesis pre. Departamento Mecánica de medios continuos y teoría de estructuras*, Universidad de Sevilla, España, 2013. [En línea]. Disponible:
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5275/fichero/PFC-ALEJANDRO+CALVO.pdf>
- [29] A. D. Padsalgikar, “4 - Biological Properties of Plastics,” *Plastic in medical devices for cardiovascular applications*, 2017, pp. 83–102.
- [30] Mexpolímeros (s.f) “Hidrólisis”. [En línea].<https://www.mexpolimeros.com/hidr%C3%B3lisis.html>
- [31] S. S. Pesetskii, B. Jurkowski, Y. Krivoguz, y A. I. Kuzavkov, “Oxidation of LDPE and LDPE grafted with itaconic acid, in contact with water,” *Polymer*, vol. 41, no. 3, pp. 1037–1043, 2000, doi:
[https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(99\)00267-0](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(99)00267-0). [Acceso: septiembre 5, 2020]

- [32] R. Miandad, M. A. Barakat, A. S. Aburiazza, M. Rehan, y A. S. Nizami, "Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review," *Process Safety and Environmental Protection*, vol 102, pp. 822-838, July, 2016, doi: 10.1016/j.psep.2016.06.022 . [Acceso: octubre 5, 2020]
- [33] K. T. Kumaran y I. Sharma, "Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review," *ASET* 2020, doi: 10.1109/ASET48392.2020.9118286. [Acceso: octubre 5, 2020]
- [34] A. López, I. de Marco, B. M. Caballero, M. F. Laresgoiti, A. Adrados, y A. Torres, "Pyrolysis of municipal plastic wastes II: Influence of raw material composition under catalytic conditions," *Waste Manag.*, vol. 31, pp. 1973-1983, 2011, doi: 10.1016/j.wasman.2011.05.021.
- [35] P. T. Williams, E. A. Williams, "Fluidised bed pyrolysis of low density polyethylene to produce petrochemical feedstock," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 51, pp. 107-126, 1999, doi: 10.1016/S0165-2370(99)00011-X. [Acceso: octubre 1, 2020]
- [36] E. Erawati, Hamid, y D. Martenda, "Kinetic study on the pyrolysis of low-density polyethylene (LDPE) waste using kaolin as catalyst," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 778, 2020, doi: 10.1088/1757-899x/778/1/012071.[Acceso: octubre 1, 2020]
- [37] PLÁSTICOS PROTOCOLO: Curso de Procesos de Manufactura, Edición 2007-2. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Facultad de ingeniería industrial laboratorio de producción, 2007. [En línea]. Disponible en: https://esc-web-dev.s3.amazonaws.com/staging/documents/2734_plimeros.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAWFY3NGTFNDEDHBGJ&Signature=bGVFXqnpJHXJVM%2F6G%2BwibE%2FaF4%3D&Expires=1610170330
- [38] E. Hérnida, "Polímeros", en *Colección Materiales y materias primas*, Buenos Aires, Argentina, Ministerio de Educación - Instituto Nacional de Educación Tecnológica, 2011, pp.17.
- [39] F., Muñoz Pinto, "Procesamiento Y Propiedades De Algunas Poliolefinas". Grupo de Polímeros. Departamento de Química. Facultad de Ciencias. Universidad de Los Andes. Mérida. Venezuela, [En línea]. Disponible en: <http://www.ehu.eus/reviberpol/pdf/publicados/fidel.pdf>
- [40] F. Z. Arrakhis et al, "Mechanical and thermal properties of natural fibers reinforced polymer composites: Doum/low density polyethylene", *Rev. Materials & design*, vol. 43, pp. 200- 205, jan.

2013. [Online]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.056> [Acceso: noviembre 22, 2020]
- [41] MatWeb. "Overview of materials for Low Density Polyethylene (LDPE), Film Grade". [En línea]. <http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=9ff98d958a714b2a8a00990a929d6f14&cck=1> [Acceso: agosto 28, 2020].
- [42] Goodfellow. "Polietileno- Baja Densidad (LDPE) Información sobre el material". [En línea]. <http://www.goodfellow.com/S/Polietileno-Baja-Densidad-Polimero.html> [Acceso: septiembre 6, 2020].
- [43] T. Marques Passos, J. C. Marconato, & S. M. Martins Franchetti, "Biodegradation of films of low density polyethylene (LDPE), poly(hydroxybutyrate-co-valerate) (PHBV), and LDPE/PHBV (70/30) blend with Paecilomyces variotii", Rev. Polímeros., vol. 25, n° 1, pp. 29 - 34. 2015. [Online]. Disponible en: <https://revistapolimeros.org.br/article/10.1590/0104-1428.1432/pdf/polimeros-25-1-29.pdf> [Acceso: octubre 5, 2020].
- [44] Omnexus (s.f.). "Polyethylene (PE)". [En línea]. Disponible en: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyethylene-plastic> [Acceso: agosto 28, 2020].
- [45] T. R., Crompton. (2014). Engineering Plastics. (first edition) [En línea]. Disponible en: <https://ezproxy.uamerica.edu.co:2203/ehost/ebookviewer/ebook/ZTAwMHh3d19fNzk1MjMyX19BTg2?sid=3408f751-6674-4ae9-a498-2cdae4113496@sdv-sessmgr02&vid=3&format=EB&rid=1>
- [46] R. S. Caicedo Coloma, Análisis De La Estructura Molecular De Materiales Poliméricos Usando La Técnica De Espectrometría Infrarroja(curs), tesis pre. Facultad de Ingeniería en Mecánica y ciencias de la producción, Escuela superior politécnica del litoral, Quito, Ecuador, 2010. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/11943>
- [47] F. Torres García, "Polímeros: procesos de manufactura y diseño. Parte 1: termoplásticos", Rev. Química PUCP., vol. 13, n° 1, pp. 55-67, jun. 1999. [Online]. Disponible en:

- <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/4702/4707> [Acceso: noviembre 22, 2020]
- [48] G. M. Basso, P. I. Paulin-Filho; R. E. S. Bretas; A. Bernardi, "Correlação entre propriedades reológicas e ópticas de filmes tubulares de polietileno linear de baixa densidade com diferentes distribuições de ramificações curtas", *POLIMEROS*, vol. 16, n°. 2, pp. 149-157, 2006, doi: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282006000200016&lng=pt&tlng=pt [Acceso: octubre 16, 2020].
- [49] IDEAM (s.f) "Generalidades de la radiación ultravioleta". [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima//generalidades-de-la-radiacion-ultravioleta>
- [50] A. Martínez Romo, R. González Mota, J. J. Soto Bernal, y I. Rosales Candelas, "Investigating the Degradability of HDPE, LDPE, PE-BIO, and PE-OXO Films under UV-B Radiation," *J. Spectrosc.*, 2015, doi: 10.1155/2015/586514 [Acceso: septiembre 14, 2020]
- [51] Plastivida, "Degradación de los Materiales Plásticos," *CIT*, no 21, 2007. [En línea] Disponible en: <http://ecoplas.org.ar/pdf/21.pdf> [Acceso: julio 10, 2020]
- [52] Z. Montazer, M. B. Habibi Najafi, M. Mohebbi, y A. Oromiehei, "Microbial Degradation of UV-Pretreated Low-Density Polyethylene Films by Novel Polyethylene-Degrading Bacteria Isolated from Plastic-Dump Soil," *J. Polym. Environ.*, 2018, doi: 10.1007/s10924-018-1245-0 [Acceso: junio 26, 2020]
- [53] Plásticos. [En línea]. Disponible en: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6174/03_Mem%C3%B2ria.pdf?sequence=4&isAllowed=y [Acceso: septiembre 12, 2020]
- [54] G. López Tolentino, *Ventajas Y Desventajas De Los Plásticos Degradables Para Su Aplicación En La Agricultura Sustentable O Ecológica*, tesis pos. Centro de investigación en química aplicada, Coahuila, México, 2012. Disponible en: <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/371/1/Gorgonio%20Lopez%20Tolentino.pdf>
- [55] V. C, Gonzáles Alcos, *Capacidad biodegradativa de hongos filamentosos frente al polietileno*,

tesis pos. Escuela de posgrado, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú, 2019. Disponible en: <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/12254>

- [56] D. A Moreno Bayona, *Biotransformación de polietileno de baja densidad (LDPE) y LDPE oxo-biodegradable empleando Pleurotus ostreatus y residuos lignocelulósicos de pino (Pinus caribaea)*, tesis pos. Facultad de Ciencias, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 2018. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/40333/Tesis%20maestri%CC%81a-%20Diana%20Alejandra%20Moreno.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [57] M. A. Erazo Pérez, “Evaluación del comportamiento de *aspergillus niger* y *penicillium spp* en la degradación de bioplástico elaborado a partir de almidón de cáscara de plátano”, tesis pre. Facultad de ciencias, Escuela superior politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/10554/1/236T0413.pdf>
- [58] Probiotek, “Agar de dextrosa y papa”, Probiotek Dibico S.A, México, catálogo 1059, (s.f), pp. 1. [En línea]. Disponible en: http://www.probiotek.com/wp-content/uploads/2014/01/1059-E_AGAR-DEXTROSA-Y-PAPA.pdf
- [59] M. Saénz, T. Borodulina, L. Díaz, & C. Banchon “Minimal Conditions to Degrade Low Density Polyethylene by *Aspergillus terreus* and *niger*”, *Journal of Ecological Engineering*, vol. 20, no. 6, pp. 44-51, jul, 2019, doi: <https://doi.org/10.12911/22998993/108699> [Acceso: junio 6, 2020]
- [60] Becton Dickinson, “BBL Sabouraud Dextrose Agar BBL Sabouraud Dextrose Agar with Chloramphenicol”, Becton Dickinson company BD, Maryland L007492 Rev. 08, Marzo 2007, pp.1 - 4. [En línea] Disponible en: [https://legacy.bd.com/europe/regulatory/Assets/IFU/US/L007492\(08\)\(0307\)_ES.pdf](https://legacy.bd.com/europe/regulatory/Assets/IFU/US/L007492(08)(0307)_ES.pdf)
- [61] A. Esmaili, A. A. Pourbabae, H. A. Alikhani, F. Shabani, y E. Esmaili, “Biodegradation of Low-Density Polyethylene (LDPE) by Mixed Culture of *Lysinibacillus xylanilyticus* and *Aspergillus niger* in Soil,” *PLOS One*, vol. 8, no. 9, Sep. 2013, doi: 10.1371/journal.pone.0071720. [Acceso: junio 18, 2020]

- [62] B. M. Kyaw, R. Champakalakshmi, M. K. Sakharkar, C. S. Lim, y K. R. Sakharkar, "Biodegradation of Low Density Polythene (LDPE) by Pseudomonas Species," *Indian J. Microbiol.*, 2012, doi: 10.1007/s12088-012-0250-6.
- [63] N. Cruz , D. Castellanos, y H. Argüello, "Degradación de celulosa y xilano por microorganismos aislados de dos tipos de compost de residuos agrícolas en la Sabana de Bogotá," *Rev. Colomb. Ciencias Hortícolas*, vol 3, no 2, pp. 237-249 2009, doi: 10.17584/rcch.2009v3i2.1215. [Acceso: diciembre 15,2020]
- [64] E. Rudé Payró y R. Torres Castillo, "Evaluación de diferentes modelos de compostadores domésticos," *Univ. Barcelona*, Feb,2008,[Online]. Disponible en: <http://www.compostaenred.org/documentacion/1casEvaluaci%C3%B3n%20de%20compostadores%20Barcelona.pdf>
- [65] W. Bohórquez Santana. (2020). *El proceso de compostaje*. [En línea]. Disponible en: <https://ciencia.lasalle.edu.co/libros/72/>
- [66] N. Raaman, N. Rajitha, A. Jayshree, y R. Jegadeesh, "Biodegradation of plastic by Aspergillus spp. Isolated from polythene polluted sites around Chennai," *J. Acad. Indus. Res*, vol. 1, pp. 313–316, Jan. 2012 [Online]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/284572114_Biodegradation_of_plastic_by_Aspergillus_spp_Isolated_from_polythene_polluted_sites_around_Chennai [Acceso: junio 18,2020]
- [67] A. Vélez Pereira, Y. Camargo, " Evaluación de la concentración de bioaerosoles fungi asociados al relleno sanitario palangana, santa marta-colombia" [Online] Disponible en: <http://www.redisa.net/doc/artSim2009/TratamientoYValorizacion/Evaluaci%C3%B3n%20de%20la%20concentraci%C3%B3n%20de%20bioaerosoles%20Fung%C3%AD%20asociados%20al%20relleno%20sanitario%20Palangana.pdf>
- [68] F. Shabani, L. Kumar, y A. Esmaili, "A modelling implementation of climate change on biodegradation of Low-Density Polyethylene (LDPE) by Aspergillus niger in soil," *Glob. Ecol. Conserv.*,vol. 4, pp. 388-398, 2015, doi: 10.1016/j.gecco.2015.08.003. [Acceso: junio 18,2020]

- [69] S. Selke, R. Auras, T. A. Nguyen, E. Castro Aguirre, R. Cheruvathur, y Y. Liu, "Evaluation of biodegradation-promoting additives for plastics," *Environ. Sci. Technol.*, 2015, doi: 10.1021/es504258u.
- [70] F. Slimani, A. Hedir, M. Moudoud, y A. Loucif "Ultraviolet radiation Effect on the Electrical and Mechanical Properties of Low Density Polyethylene (LDPE)", abril, 2019 [Online]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/333853329_Ultraviolet_radiation_Effect_on_the_Electrical_and_Mechanical_Properties_of_Low_Density_Polyethylene_LDPE [Acceso: septiembre 14, 2020]
- [71] Y. Orhan, J. Hrenović, y H. Büyükgüngör "Biodegradation of plastic compost bags under controlled soil conditions", *Acta Chim. Slov.*, vol. 51, pp. 579-588, 2004 [Online]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/281577606_Biodegradation_of_plastic_compost_bags_under_controlled_soil_conditions
- [72] A. G. Villaba Villaba y G. V. Azuara Gómez, Aislamiento e identificación de *Aspergillus niger* y evaluación de su tolerancia a metales tóxicos, en XV encuentro participación de la mujer en la ciencia, México, 2018, pp. 794-803. Disponible en: https://www.cio.mx/archivos/avances_de_la_ciencia_en_Mexico_2018/Capitulo_2.pdf
- [73] L. Carrillo "Aspergillus", en *Los hongos de los alimentos y forrajes*, Salta, Argentina, Universidad de Salta, 2003, pp. 44-60.
- [74] E. Schuster, N. Dunn-Coleman, J. Frisvad & P. van Dijck, "On the safety of *Aspergillus niger* – a review", *Rev. Applied Microbiology and Biotechnology.*, vol. 59, pp. 426- 435, ene. 2002. [Online]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00253-002-1032-6> [Acceso: noviembre 20, 2020].
- [75] A. Sáez Vega, L. Flórez Valdés, A. Cadavid Rendón, "Caracterización de una cepa nativa de *Aspergillus niger* y evaluación de la producción de ácido cítrico", *Rev. Investig.*, n°128, pp. 33-41, abr. 2002. [Online]. Disponible en: <https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/845> [Acceso: noviembre 30, 2020].

- [76] M. Ruiz, K. Pastor y A. Acevedo, "Biodegradabilidad de Artículos Desechables en un Sistema de Composta con Lombriz", *Inf. Tecnol.*, vol. 24, n° 2, pp. 47-56, 2013. [Online]. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642013000200007 [Acceso: noviembre 26, 2020].
- [77] M. F. Rabell Contreras, et al, "Estudio de factibilidad de biodegradación de plásticos mediante composteo", en *Hacia la sustentabilidad: Los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima*, 2011, pp.519-523.
- [78] I. George Mason, *A STUDY OF POWER, KINETICS, AND MODELLING IN THE COMPOSTING PROCESS*, tesis pre. Universidad de Canterbury, Nueva Zelanda, Christchurch ,2007. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10092/1214>
- [79] N. Kabbashi, O. Suraj, M. Z Alam y E. MSM, "Kinetic Study for Compost Production by Isolated Fungal Strains", *Int J Waste Resour*, vol.4, pp 2-6, 2014, doi: 10.4172/2252-5211.1000169
- [80] J. F. Saldarriaga, J. L. Gallego y J. E. López, "Determination of kinetics parameters for composting process of the organic fraction of municipal solid waste separated at source", *AIDIC*, vol 70, pp 217-222, doi: 10.3303/CET1870037
- [81] P. Das, P. Tiwari, "Thermal degradation kinetics of plastics and model selection", *TA*, vol 654, no. 10, pp 191-202, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2017.06.001>

GLOSARIO

Agente solvolítico: Compuestos involucrados en la hidrólisis, glicólisis o alcoholisis para ser transformados nuevamente en sus monómeros básicos.

Anisotropía: Capacidad que puede tener una pieza moldeada o extruida de diferir entre el valor de una propiedad física a lo largo o a lo ancho.

Copolímero: Polímero constituido por una cadena con 2 o más monómeros químicamente diferentes que pueden estar en distintas secuencias.

Caolín: mineral hidratado con silicato de aluminio y conformado por minerales de feldespato. Interviene como catalizador en la elaboración de productos como sulfato de aluminio y alúmina.

Celda activa: Primera etapa en donde se descargan los residuos sólidos en un relleno sanitario.

Celda pasiva: Terrazas y terraplenes en las celdas de disposición de los rellenos sanitarios. Cuenta con un sistema de evacuación de gases producidos por la degradación anaerobia.

Cizallamiento: Acción o estrés resultante de fuerzas aplicadas que causa que dos partes de un cuerpo se deslicen en direcciones paralelas.

d2w: Aditivo oxo-biodegradable fabricado por Symphony Environmental, agregado al polietileno, poliestireno y polipropileno para acelerar su degradación.

Elastómeros: Aquellos polímeros que recuperan su forma original después de ser sometidos a una tensión o estiramiento.

Homopolímero: Polímero cuya cadena se encuentra formada por monómeros idénticos.

Humus: Producto escatológico elaborado por las lombrices que puede ser aprovechado de diversas formas para nutrir los suelos.

LDPE-g-IA: Polímero inyectado con ácido itacónico, el cual es mezclado en la fase de extrusión. Esta mezcla permite aumentar la resistencia al impacto de los polímeros.

Mineralización: Descomposición de polímeros grandes en dióxido de carbono.

Pseudoplástico: Fluido con características de fluidez por esfuerzo de corte, en donde su viscosidad es baja a velocidades de corte altas, pero su viscosidad será alta si las velocidades de corte son bajas.

Proteínas hidrofobinas: Familia de proteínas producidas por hongos miceliales, que exhiben una capacidad para auto ensamblarse y unirse a una superficie hidrofílica/hidrofóbica.

Termoplástico: Polímero fundido que al enfriarse adopta su forma y recupera sus propiedades iniciales. Estos polímeros son lineales como el polietileno, polipropileno, poliamida y PVC.

Unidad formadora de colonias: Unidad de medida empleada para contabilizar el número de bacterias o células fúngicas viables en una muestra líquida o sólida.

ANEXO¹

¹ Los anexos de este documento se encuentran en el documento adjunto.