

# **Biotransformación de polímeros sintéticos por medio de bacterias**

Karen Alejandra Ayala Salamanca

Universidad Nacional Abierta y a Distancia- UNAD

Escuela de Ciencias Agrarias, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA)

Programa de Ingeniería Ambiental

Bogotá

2022

**Biotransformación de polímeros sintéticos por medio de bacterias**

Karen Alejandra Ayala Salamanca

Trabajo para optar al título de Ingeniera Ambiental

Directora:

Sonia Esperanza Ruiz

Universidad Nacional Abierta y a Distancia- UNAD

Escuela de Ciencias Agrarias, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA)

Programa de Ingeniería Ambiental

Bogotá

2022

**Página de Aceptación**

---

Sonia Esperanza Ruíz

Directora Trabajo de Grado

---

Jurado

---

Jurado

Bogotá - 2022

## **Agradecimientos**

En primera instancia quiero agradecerle a Dios, por darme el don de la sabiduría, por las bendiciones que me brinda día a día, por mi salud y por las oportunidades de crecimiento personal y profesional.

A mi madre, por el apoyo incondicional en la formación de mi carrera, los valores inculcados y la participación en el desarrollo de mis triunfos.

A mis familiares más cercanos, por su apoyo y acompañamiento en el proceso de formación.

A mi pareja sentimental, por animarme al cumplimiento de mis objetivos.

A mi directora de grado por su acompañamiento en el desarrollo de la monografía y sus constantes retroalimentaciones de mejora.

Por último, a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia por la formación recibida como Ingeniera Ambiental.

## Resumen

La monografía tiene como objetivo realizar la revisión del estado del arte sobre biodegradación de polímeros por medios enzimáticos, el cual servirá de instrumento para futuros desarrollos científicos asociados a la biodegradación enzimática de polímeros.

La metodología usada para el desarrollo de la monografía se basó en la búsqueda de resultados de proyectos científicos e investigativos asociados a la biodegradación enzimática de polímeros, se tomó como referencia los siguientes criterios: tipo de polímero, enzima asociada, tiempo de exposición, pre- tratamientos, análisis de resultados y efectividad del proceso.

Los resultados de la investigación, arrojaron que la efectividad del proceso se mide en dos formas, la primera está asociada al porcentaje de biodegradabilidad (%) y la segunda a la pérdida de peso, para el primer caso el estudio más efectivo fue la degradación microbiana del polietileno de baja densidad (LDPE) por *Aspergillus clavatus* cepa JASK1 aislada de suelo de relleno sanitario, ya que logro degradar el 35% del polímero en un periodo de tiempo de 90 días, mediante técnica de incubación y para el segundo caso, el estudio más efectivo fue la biodegradación enzimática y microbiana de copolímero de tereftalato de etileno, ya que logro una reducción de peso de 30 mg en 90 días, por medio de la incubación de las enzimas *cylindracea*, *Javanicus*, *filamentosos* *Aspergillus niger* y *Penicillium pinophilum*.

**Palabras claves:** polímero, biodegradación, enzimas, monografía.

## Abstract

The monograph aims to review the state of the art on polymer biodegradation by enzymatic means, which will serve as an instrument for future scientific developments associated with enzymatic polymer biodegradation.

The methodology used for the development of the monograph was based on the search for results of scientific and research projects associated with the enzymatic biodegradation of polymers, the following criteria were taken as reference: type of polymer, associated enzyme, exposure time, pre- treatments, analysis of results and effectiveness of the process.

The results of the investigation showed that the effectiveness of the process is measured in two ways, the first is associated with the percentage of biodegradability (%) and the second with weight loss, for the first case the most effective study was microbial degradation. of low-density polyethylene (LDPE) by *Aspergillus clavatus* strain JASK1 isolated from landfill soil, since it managed to degrade 35% of the polymer in a period of time of 90 days, through the incubation technique and for the second case, the study The most effective was the enzymatic and microbial biodegradation of ethylene terephthalate copolymers, since it achieved a weight reduction of 30 mg in 90 days, through the incubation of the enzymes cylindracea, Javanicus, filamentous *Aspergillus niger* and *Penicillium pinophilum*.

**Keywords:** polymer, biodegradation, enzymes, monograph.

**Tabla de contenido**

<b>Lista de tablas</b>	9
<b>Lista de figuras</b>	10
<b>Introducción</b>	11
<b>Problema</b>	12
Descripción del problema	12
Planteamiento del problema	12
Sistematización del problema	13
<b>Justificación</b>	15
<b>Objetivos</b>	16
Objetivo general	16
Objetivos específicos	16
<b>Marco Teórico</b>	17
Polímeros	17
Obtención de polímeros	19
Uso de Polímeros	21
Propiedades Físicoquímicas de los polímeros	24
<b>Problemática Ambiental</b>	35
Producción mundial	35
<b>Impacto Ambiental</b>	42

	8
<b>Procesos de degradación de los polímeros</b>	48
Degradación Térmica	48
Degradación por radiaciones	50
Degradación Mecánica	54
Degradación Química	55
Biodegradación	56
<b>Enzimas</b>	61
<b>Estado de Arte Biodegradación de Polímeros</b>	64
Revisión de Artículos Científicos Asociados a la Biodegradación de polímeros	79
<b>Análisis de Resultados</b>	85
<b>Identificación de avances investigativas entorno a la degradación de plásticos</b>	97
<b>Conclusiones</b>	102
<b>Recomendaciones</b>	104
<b>Bibliografía</b>	105

## Lista de tablas

Tabla 1- Tipos de Polímeros	18
Tabla 2-Uso de plástico para envase y embalaje	22
Tabla 3-Estructura Química Polímeros	25
Tabla 4-Temperatura de fusión y transición de polímeros.	33
Tabla 5- Producción de plástico año 2018 en principales países Vs Colombia	37
Tabla 6- Estimación de toneladas de plástico vertidas al mar	45
Tabla 7- Estimación Residuos Plásticos Flotantes en Cuencas Oceánicas	46
Tabla 8- Descripción y funcionalidad de las enzimas	61
Tabla 9- Crecimiento consorcios fúngicos II	66
Tabla 10-Tabla Revisión de Artículos Científicos Asociados a la Biodegradación de Polímeros	79
Tabla 11-Tipos de polímeros más usados en el desarrollo de estudios de biodegradación enzimática	86
Tabla 12- Microorganismos asociados a la biodegradación de polimeros	92

**Lista de figuras**

<b>Figura 1</b>	17
<b>Figura 2</b>	21
<b>Figura 3</b>	35
<b>Figura 4</b>	40
<b>Figura 5</b>	41
<b>Figura 6</b>	43
<b>Figura 7</b>	48
<b>Figura 8</b>	59

## Introducción

El plástico es un elemento fundamental para el ser humano, ya que tiene infinidad de usos que facilitan el desarrollo de la sociedad, sin embargo, también es causante de una problemática ambiental difícil de enfrentar, esto se debe al acumulo de residuos plásticos en rellenos sanitarios, ecosistemas acuáticos y terrestres, a pesar de que existen varios métodos de tratar el residuo, estos procesos terminan afectando los recursos naturales por condiciones propias del tratamiento y disposición final.

La presente monografía se desarrolla con el fin de realizar un estado de arte sobre la biodegradación enzimática de polímeros, debido a que es una técnica que en caso de aplicarse a nivel global y grande escala, daría una solución racional y sustentable para afrontar la problemática ambiental por acumulo de plásticos, inicialmente se explicará al lector las propiedades físico-químicas de los polímeros, ya que estas influyen directamente en los proceso de biodegradación, así mismo se describirá la problemática ambiental generada por plásticos y las afectaciones a la salud humana que genera el plástico en cada fase del proceso productivo.

Finalmente, se dará a conocer los avances que se han realizado y que se están desarrollando entorno a la biodegradación de polímeros, resaltando que polímeros son más susceptibles de aprovechamiento, tipos de enzimas más efectivas y así mismo las técnicas, metodologías y condiciones de biodegradación que se deben tener presentes a la hora de desarrollar proyectos de biodegradación enzimática de polímeros.

## **Problema**

### **Descripción del problema**

A partir de 1950, la economía mundial comenzó a ser dirigida por la necesidad de consumir recursos, por lo tanto, la generación de residuos plásticos se incrementó, al punto, que para 1960 miles de millones de artículos plásticos llenaban los basureros, rellenos sanitarios e incineradoras del mundo, esto género que los sistemas de disposición final colapsarán, así que, los residuos plásticos terminaban dispuestos en ecosistemas marítimos y terrestres, convirtiéndose en una de las problemáticas ambientales más fuertes de la historia.. (Stiftung, 2019, p. 12).

### **Planteamiento del problema**

La acumulación de plásticos impacta directa e indirectamente los recursos naturales, El ecosistema acuático es el principal entorno afectado, ya que los desechos plásticos figuran entre las principales amenazas a la biodiversidad y son motivo de preocupación debido a su abundancia, durabilidad y persistencia en el medio ambiente marino.

De acuerdo con el informe científico “Mar del Plástico”, la forma en que los impacta es por medio de ingestión y enredo, se evidencia que por lo menos 44.006 individuos de 395 especies han sido afectados. (Elias, 2015, p.7)

El 80% de la contaminación marina por plásticos se deriva por fuentes terrestres y el 20% restante es de origen marino, esta contaminación genera obstrucción de los sistemas de enfriamiento en producción energética, enredo de hélices, afecta el desarrollo de la acuicultura, fomenta la ingesta de plástico en especies marinas lo que genera la liberación de sustancias tóxicas y reducción de la eficiencia de los procesos fisiológicos con el consecuente riesgo de

muerte directa o indirecta, de modo que el aumento de restos plásticos en los océanos está directamente asociado con el consumo irresponsable del plástico y la falta de concientización de la población (Elias, 2015, p.7)

(Acoplasticos, 2021) muestra que, la producción actual de plástico en Colombia es de 273.770,7 de toneladas por año, de este valor solo se recicla el 17%, que corresponde 46.541 toneladas de plástico. (p.9).

La causa principal de esta problemática es la poca conciencia ambiental que tenemos los humanos, ya que por medio de acciones simples podríamos evitar tanta generación de plástico, adicionalmente las autoridades competentes junto con la industria no han ejecutado un plan de acción enfocado en un ciclo cerrado de envases plásticos, lo que incrementa la generación de miles de toneladas de residuos plásticos que afectan el entorno ambiental y la población.

El sistema de reciclaje en Colombia aún no es lo suficientemente efectivo para realizar una gestión integral adecuada a dichos materiales, por esta razón la población tiene gran responsabilidad en la implementación de estrategias básicas que contribuyan a la minimización de residuos plásticos, por medio de la reducción en el uso de botellas y empaques plásticos innecesarios.

Por lo anterior, surge la necesidad de crear alternativas complementarias a la degradación del plástico empleando métodos biológicos enzimáticos, aerobios, anaerobios que sirven como opción de control y reducción de dichos residuos.

### **Sistematización del problema**

Mediante el desarrollo de la presente monografía se pretende promover la biodegradación de plásticos por medio de enzimas, como alternativa de solución, ya que el proceso de

biodegradación no genera un impacto ambiental significativo a diferencia de los otros métodos de degradación, las enzimas se pueden adaptar en medios acuáticos y terrestres y esta biodegradación no generaría un residuo final, a diferencia de los demás tratamientos de eliminación de plástico.

En la monografía se encontrará información base que será de utilidad para el desarrollo de avances científicos asociados a la biodegradación enzimática de polímeros. .

## **Justificación**

La problemática ambiental generada por acumulo de plásticos, es una situación que no pasa desapercibido en la sociedad, en la que se identifican afectaciones significativas al entorno ambiental, como la muerte de miles de especies marítimas, la contaminación visual que generan los residuos plásticos depositados en suelos, playas, reservas naturales terrestres y marítimas y el colapso que se evidencia en rellenos sanitarios y plantas de tratamiento y disposición final de residuos.

De acuerdo a lo anterior, surgió la necesidad de investigar algo más allá de lo que se evidencia a simple vista, encontrando información relevante que permitió identificar de una manera más detallada la problemática ambiental y así mismo la técnica de biodegradación por procesos enzimáticos, se evidenció que desafortunadamente los avances se han quedado en proyectos de investigación científica cuyo resultados han sido satisfactorios, en caso de implementarse estos proyectos a nivel industrial y a grande escala, es decir que soporten la demanda de plástico, se obtendrían magníficos resultados y sería un avance importante en el desarrollo de la ciencia, ya que, daría la solución a la problemática ambiental que se ha estado buscando desde décadas atrás.

Por esta razón, el proceso investigativo estuvo en torno a la biodegradación enzimática de polímeros, de esta manera mostrar al lector el panorama completo, resaltando los beneficios de implementar esta técnica de biodegradación.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Realizar una revisión del estado del arte sobre la biodegradación de polímeros por medios enzimáticos.

### **Objetivos específicos**

Analizar las propiedades químicas y físicas de los polímeros.

Revisar los tipos de microorganismos que están asociados a la biodegradación de polímeros.

Identificar el estado de los avances de las investigaciones realizadas a la biodegradación de plásticos a nivel mundial.

## Marco Teórico

### Polímeros

Los polímeros son macromoléculas que se forman a partir de la unión de varias moléculas llamadas monómeros, formando así un enlace covalente, los polímeros pueden ser de origen natural, semisintético o sintético:

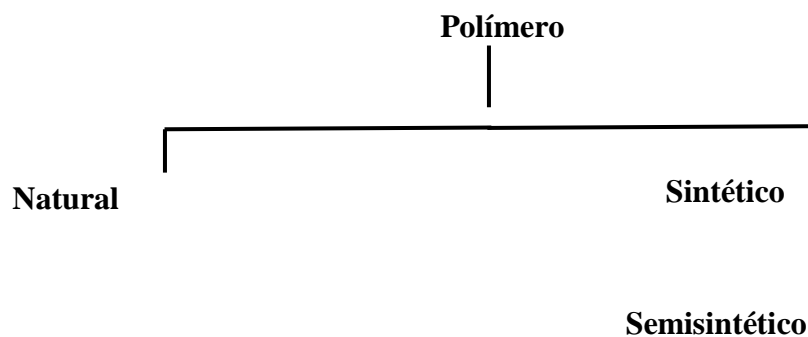
**Polímero** → Unión de dos o más monómeros.

**Monómero** → Moléculas orgánicas formadas por átomos de carbono (C), hidrogeno (H) y oxígeno (O).

(Valencia, 2016)

### Figura 1

*Tipo de Polímeros*



**Fuente:** (Valencia, 2016)

**Nota:** Se muestran los tipos de polímeros: natural, sintético y semisintético.

**Polímeros naturales:** Provenientes de seres vivos, como el caucho, polisacárido, almidón, glucógeno y proteínas.

**Polímeros sintéticos:** Obtenidos mediante un proceso industrial o de laboratorio, como el nylon, poliestireno, poli cloruro de vinilo, entre otros.

**Polímeros semisintético:** Obtenidos mediante un proceso de transformación de polímeros naturales, como la nitrocelulosa o el caucho vulcanizado. (Valencia, 2016)

Dependiendo del uso y del tipo del polímero, el plástico no proporciona un uso a largo plazo, lo que concluye una disposición de este, ahora, la educación ambiental y concientización que los habitantes tenemos en cuanto a reciclaje no es muy alentadora, ya que, por mala segregación en fuente, estos residuos son desechados en un relleno sanitario o en el peor de los casos incinerados artesanalmente.

Por lo anterior, es importante crear estrategias enfocadas en controlar la problemática ambiental por acumulación de plásticos y contaminación de fuentes hídricas y terrestres.

**Tabla 1**

*Tipos de Polímeros*

<b>Polímero</b>	<b>Abreviatura</b>	<b>Ecuación Química</b>
Polietileno	PE	$C_2H_4$
Polipropileno	PP	$C_3H_6$
Poliestireno	PS	$C_8H_8$
Poli (Cloruro de Vinilo)	PVC	$C_2H_3Cl$
Poliacrilonitrilo	PAN	$C_3H_3$
Poli (Metacrilato de metilo)	PMMA	$C_5H_8O_2$
Polibutadieno	PB	$C_5H_8$

Poliéster		$C_{10}H_8O_4$
Poliamida	PA	$C_{12}H_{22}N_2O_2$
Poli (Etilen Tereftalato)	PET	$C_{10}H_8O_4$

(Científicos, 2005)

**Nota:** En la tabla 1 se listan los polímeros y se asocia su abreviatura y ecuación química.

### Obtención de polímeros

Los polímeros son generados mediante un proceso de transformación llamado Polimerización que consiste en realizar una unión por medio de enlaces covalentes con pequeñas moléculas orgánicas que se denominan monómeros.

Los monómeros son moléculas orgánicas formadas por átomos de carbono, hidrogeno y oxígeno, estos, establecen enlaces covalentes, Metano  $CH_4$ , propano  $C_2H_2$  y etileno  $C_2H_4$ .

(Compuestos, 2017)

Los monómeros se forman y se obtiene el polímero de las siguientes formas:

#### Condensación

Se constituyen por medio de la eliminación de agua o molécula sencilla entre monómeros, algunos polímeros que se forman mediante esta técnica son:

Poliamidas, poliéster, poliuretanos, resinas fenol- formaldehido y melanina-formaldehido.

(Compuestos, 2017)

Los polímeros que se forman por el método de condensación tienen las siguientes características:

Formación de Poliésteres, poliamidas, polis anhidros, se eliminan por agua o alcoholes, con moléculas bifuncionales, como ácidos o glicoles, diaminas, diesteres, etc.

Formación de poli hidrocarburos, estos se eliminan por halógenos o haluros de hidrogeno, se ayuda por medio de catalizadores metálicos o de haluros metálicos.

Finalmente, está la formación mediante poli sulfuros o eliminación de cloruro de sodio, haluros bifuncionales de alquilo o arilo y sulfuros alcalinos, poli sulfuros alcalinos y oxidación de dimercaptanos.

Por esta razón, la masa molecular de un polímero no es un múltiplo exacto de la masa molecular del monómero, los polímeros de condensación se dividen en dos grupos:

**Homopolímeros:** Polietilenglicol, siliconas.

**Copolímero:** Baquelitas, poliésteres y poliamidas.

*(Compuestos, 2017)*

### **Polímeros por adición**

La polimerización por adición puede transcurrir a través de un mecanismo, en el que se formen radicales libres como especies intermedias en el curso de la reacción.

También, se puede estructurar mediante la formación de iones carbocationes o carbaniones.

En ambos casos, la reacción transcurre mediante tres etapas:

**Iniciación:** Formación de monómeros activados.

**Propagación:** Formación de cadena activada.

**Terminación:** Pérdida de la actividad y producción del polímero.

(polimeros, 2017)

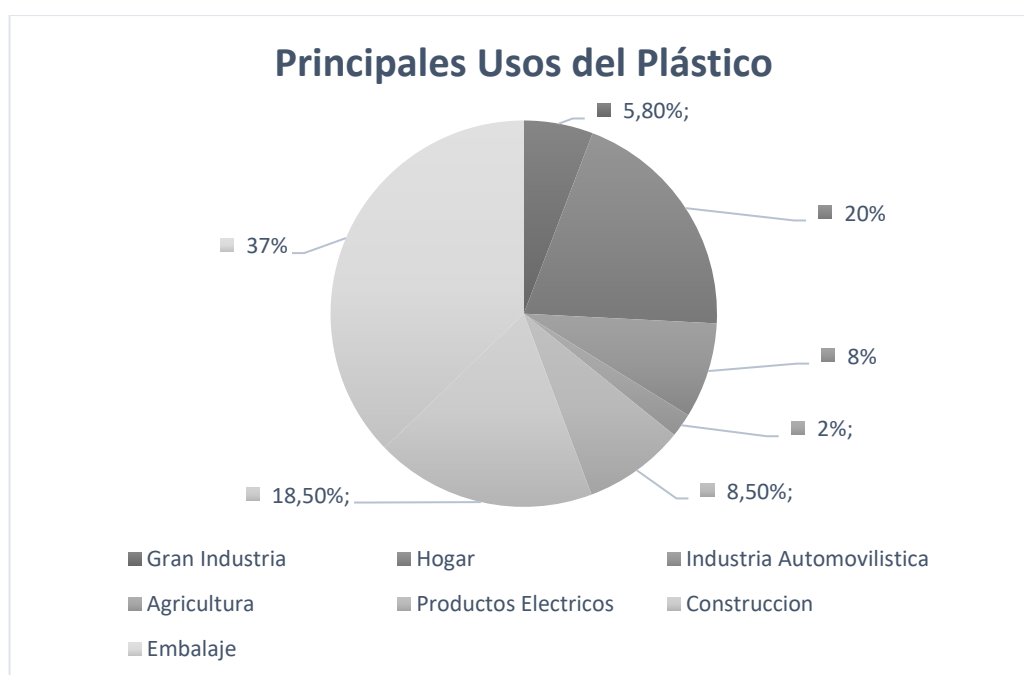
## Uso de Polímeros

De acuerdo con cifras del ministerio de medio ambiente, medio rural y marino del gobierno de España, el uso de plásticos tiene la siguiente representación a nivel mundial:

(Ministerio de Medio Ambiente, 2009).

### Figura 2

#### *Principales usos del plástico*



(Ministerio de Medio Ambiente, 2009)- Modificada por el autor

**Nota:** Se describen los principales usos del plástico, con un porcentaje aproximado.

Como se observa en la gráfica, el mayor porcentaje lo obtiene el uso de plástico para embalaje, usando el 37% del plástico a nivel mundial. (Ministerio de Medio Ambiente, 2009)

Los tipos de plásticos usados para envases y embalaje son los siguientes:

**Rígidos:** Botellas, frascos, cajas y estuches.

**Termoformados:** Empaques plásticos usados para almacenar alimentos.

**Flexibles:** Mallas, film, multicapas.

(Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2015).

**Tabla 2**

*Uso de plástico para envase y embalaje*

<b>Tipo</b>	<b>Uso</b>
PET- Tereftalato de polietileno	- Botellas de bebidas.
	- Botellas de salsas y condimentos.
	- Envases de aceite.
	- Embalaje cosmético y Medicamento.
PEAD- Polietileno de alta densidad	- Bolsas de compras.
	- Baldes.
	- Botellas de lácteos.
	- Botellas de shampoo,

---

		suavizantes y detergentes
PVC- Poli cloruro	-	Lonas y carteles publicitarios.
	-	Envolturas golosinas.
PEBD- Polietileno de baja densidad	-	Bolsas para alimentos congelados.
	-	Bolsas de compras.
	-	Sacos industriales.
	-	Cubetas para hielo.
	-	Bolsas para suero.
	-	Tapas flexibles.
	-	Envases utensilios de cocina.
	-	Contenedores para yogurt.
	-	Mamilas.
	-	Vasos no desechables.
	-	Hieleras.
PS- Poliestireno	-	Cajas para huevos.
	-	Desechables.
	-	Envases de helado.

---

*Fuente: (Escuela Colombiana de Ingenieria Julio Garavito, 2015)*

**Nota:** Elementos comunes usados como envases y embalajes, haciendo alusión a los tipos de plásticos que se usan para tal fin y que hacen parte del mayor porcentaje del uso del plástico.

Este porcentaje de uso se podría reducir, usando otras alternativas de empaque que sean sostenibles para el entorno ambiental y que así mismo cumpla con las características de calidad requeridas para tal fin.

La emergencia sanitaria por COVID-19, ha incrementado el uso del plástico, especialmente en el sector hospitalario, ya que la producción, aumentó 240 Tn por día, los sistemas de reciclaje se colapsaron, por lo tanto, más del 70% de estos residuos terminaron en mares y ríos. (Flores, 2021, p. 9)

Una alternativa de reducción es el uso del quitosano, el cual es un polímero natural derivado de la desacetilación de la quitina, posee propiedades de biocompatibilidad y biodegradabilidad, se extrae de los caparazones de crustáceos e insectos, de acuerdo con estudios de publicaciones científicas como *Advanced Materials* y *Macromolecular Materials and Engineering*, se centraron en combinar el quitosano con fibroína, una proteína de la seda y se obtuvo un material más fuerte que el plástico, con propiedades de resistencia similares al aluminio pero con la mitad del peso y biodegradable, capaz de reemplazar los plásticos como bolsas de basura, envases, pañales y elementos quirúrgicos. (Rubio, 2015, p.1)

## **Propiedades Fisicoquímicas de los polímeros**

### **Estructura Química**

La estructura química de los polímeros tiene diferentes variables dependiendo el tipo de polímero al cual se hace referencia, básicamente los polímeros cuentan con átomos de carbono que componen una cadena principal haciendo que los orbitales se ubiquen y formen un tetraedro alrededor del átomo de carbono, la cohesión entre dichas cadenas son diversas y dependen de las características de los átomos, esto interfiere en la flexibilidad del polímero, su temperatura de

fusión y su cristalización, en conclusión mientras más fuertes sean las cadenas de átomos de carbono más resistentes será el polímero. (Beltran & Marcilla, 2011, p.6)

Otro aspecto importante es el tipo de estructura, ejemplo, la molécula del polietileno (PE) se conforma de unas estructuras sencillas no polares, es decir, diversas cadenas se atraen entre si debido a fuerzas intermoleculares débiles de tipo London, por esta razón el polietileno es un material muy flexible. (Beltran & Marcilla, 2011, p.7)

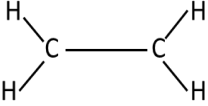
Otro es el caso para otros polímeros, como el PVC, ya que este material está formado por moléculas polares que se mantienen unidas mediante interacciones fuertes que se forman a partir de la atracción entre los átomos de cloro de una molécula y los de hidrógeno de otra cadena que da como resultado un polímero rígido. (Beltran & Marcilla, 2011, p.3)

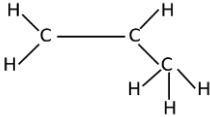



### Estructura Química Polímeros

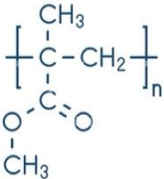
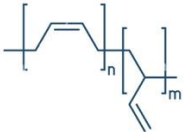
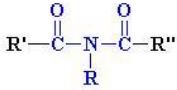
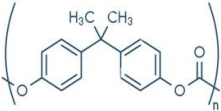
En la siguiente tabla, se muestra la estructura química de diferentes polímeros:

**Tabla 3**

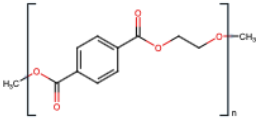
#### *Estructura Química Polímeros*

Polímero	Ab	Estructura	Descripción
	reviatura	Química	
Polietileno	PE		formada por 4 átomos de hidrógeno (H) y 2 átomos de carbono ©, unidos mediante 5 enlaces simples.

Polipropileno	PP		Estructura química	<p>formada por 6 átomos de hidrógeno (H) y 3 átomos de carbono ©, unidos mediante enlaces simples.</p>
Poliestireno	PS		Estructura química	<p>formada por 8 átomos de hidrógeno (H) y 8 átomos de carbono ©, unidos mediante enlaces simples y dobles.</p>
Poli (Cloruro de Vinilo)	PV C		Estructura química	<p>formada por 3 átomos de hidrógeno (H), 2 átomos de carbono © y 1 átomo de Cloro (Cl), unidos mediante 5 enlaces simples.</p>
lo	PAN		Estructura química	<p>formada por 6 átomos de hidrógeno (H), 4 átomos de carbono © y 1 átomo de nitrógeno (N), unidos mediante enlaces simples y uno triple.</p>

Poli			Estructura quimica
(Metacrilato de metilo)	PMMA		<p>formada por 14 atomos de hidrogeno (H), 7 atomos de carbono © y 2 atomo de oxogeno (O), unidos mediante enlaces simples y dobles.</p>
Polibutadieno	PB		<p>Estructura quimica formada por 6 atomos de hidrogeno (H), 9 atomos de carbono ©, unidos mediante enlaces simples y dobles.</p>
Poliamida	PA		<p>Estructura quimica formada por 4 atomos de carbono ©, 6 atomos de hidrogeno (H) y 2 atomo de Oxigeno (O), 1 atomo de nitrogeno (N) unidos mediante enlaces simples y dobles.</p>
Policarbonato	PC		<p>Estructura quimica formada por 16 atomos de carbono ©, 6 atomos de hidrogeno (H) y 3 atomo de</p>

---

Tereftalato de polietileno	PET		<p>Oxígeno (O), unidos mediante enlaces simples y dobles.</p> <p>Estructura química formada por 10 átomos de carbono (C), 2 átomos de hidrógeno (H) y 4 átomos de Oxígeno (O), unidos mediante enlaces simples y dobles.</p>
----------------------------	-----	---	--

---

*Fuente: (Científicos, 2005)*

**Nota:** representación gráfica y descripción de la estructura química de los polímeros.

### **Peso Molecular**

Una característica importante en la estructura de los polímeros es su peso molecular el cual está relacionado a factores como la elasticidad, temperatura de transición y fusión, para que un plástico sea realmente útil, su peso molecular debe superar los 10.000 g/mol; por ejemplo, el peso molecular del polietileno oscila entre 1.000 y 5.000 g/mol lo que hace que sea un plástico con una baja resistencia. (Beltran & Marcilla, 2011, p.27)

Existen los copolímeros que es el resultado de dos o más monómeros químicamente diferentes, estos tienen una clasificación según la secuencia de los monómeros, el cual está formado por secuencias de acrilonitrilo, butadieno y estireno, otro tipo de copolímero es el injerto como es el caso de HIPS (Poliestireno de alto impacto) que se conforma por una cadena principal de poliestireno y cadenas secundarias de Polibutadieno injertadas.

El ultimo tipo de copolímero es el azar, que solo se evidencia en un solo plástico llamado SAN (estireno acrilonitrilo). (Beltran & Marcilla, 2011, p.10)

Debido a esto, la estructura química de los copolímero es un poco más compleja que la de los polímeros, ya que, al estar formados por más de un monómero, su composición y su longitud de secuencian pueden variar, lo que limita sus composiciones finales. (Beltran & Marcilla, 2011, p.10)

### **Ramificaciones y entrecruzamiento**

Cuando en las reacciones de polimerización no existen reacciones secundarias se obtienen polímeros lineales, se pueden obtener bajo unas determinadas condiciones de polimerización, estas condiciones varían dependiendo la existencia de ramificaciones y su longitud.

Estas ramificaciones generan un volumen libre y aumentan la separación entre cadenas a partir de estos factores se determina la densidad del polímero, capacidad de cristalización, entre otras características.

Los polímeros lineales con o sin ramificaciones y los polímeros entrecruzados hacen parte de materiales denominados termoplásticos y termoestables, esta constitución establece las propiedades y sus métodos de transformación.

Esto hace referencia a que los materiales termoplásticos son polímeros lineales no entrecruzados que facilita la generación de fluidos por calentamiento para así poder tomar una figura establecida en temperatura fría, para el caso de los termoestables su estructura entrecruzada no se funden y son insolubles, para poder establecer la figura de los materiales se

toma un intermedio el cual tiene propiedades aptas para fundición a partir de la proliferación y entrecruzamiento en el proceso de forma. (Beltran & Marcilla, 2011, p.11)

### **Estructura Física**

El estado físico de los polímeros generalmente es sólido, sin embargo, se presentan tres clasificaciones, semicristalino, cristalino y amorfo, los polímeros que tienen la capacidad de cristalizar son los que tienen moléculas químicas y geométricamente regulares en su estructura, claro está, que se pueden evidenciar ciertas irregularidades como las ramificaciones en la cadena o la copolimerización de una cantidad de otro monómero, estos tipos de irregularidades pueden limitar la cristalización del polímero. (Beltran & Marcilla, 2011, p.13)

En cuanto a los polímeros en estado físico solo puede ocurrir mediante un proceso de fundición, las moléculas que componen el elemento generalmente están ovilladas y enmarañadas a menos de que haya una fuerza externa que las oriente hacia una dirección, ahora, si la energía que posee es suficiente, las moléculas lograrán moverse y así mismo los átomos de las cadenas podrán rotar alrededor de los ángulos del enlace, de esta manera se podrán generar cambios de conformación. . (Beltran & Marcilla, 2011, p.13)

A elevadas temperaturas los polímeros termoplásticos quedan en un estado líquido o fundido en el cual podrán pasar de un estado a otro, en esas circunstancias el volumen libre implicado a las moléculas es amplio por lo tanto su volumen específico también lo es, en este orden para que un segmento de determinada cadena de un polímero se mueva con respecto a otra requiere energía térmica y en dichas condiciones la energía es suficiente para que hayan dichos movimientos, conforme la temperatura desciende la energía disminuye, su cambio de

conformación es más lento y por lo tanto el volumen específico se reduce. . (Beltran & Marcilla, 2011, p.14)

Durante el proceso productivo de los polímeros, el comportamiento está relacionado a la capacidad de cristalización, ya que los polímeros cristalinos tienen regiones amorfas y cristalinas, cuando hay un proceso de recalentamiento el material se ablanda debido a que cuando llegan a su punto de fusión la estructura colapsa y adquiere movilidad, por lo cual, su procesamiento debe realizarse por encima del grado de fusión, para el caso de los amorfos debe realizarse por encima de la temperatura de transición vítrea y su reblandecimiento es gradual, estos dos polímeros tienen algo en común, contraerse en el procesamiento durante la etapa de enfriamiento, la contracción para los polímeros cristalinos suele ser de 1.5% a 3% y el de los amorfos es de 0.4% a 0.8%. (Beltran & Marcilla, 2011, p.14)

### **Densidad**

En cuanto a la densidad que pueden presentar los polímeros su variación puede ser desde  $0.9 \text{ g/cm}^3$  hasta  $2.3 \text{ g/cm}^3$ ; la baja densidad se presenta porque los átomos que componen los plásticos son ligeros y las distancias medias entre átomos dentro de los plásticos son amplias, una baja densidad puede permitir que los plásticos sean materiales ligeros y fáciles de manipular y transportar teniendo una ventaja en el diseño de piezas en las que su peso se convierte en una limitación. (Beltran & Marcilla, 2011, p.11)

### **Conductividad térmica**

Los polímeros presentan una conductividad térmica muy baja, debido a la ausencia de los electrones libres, esto representa un inconveniente en el proceso de transformación de los plásticos, el calor se absorbe de manera lenta. (Beltran & Marcilla, 2011, p.17)

### **Conductividad Eléctrica**

La resistencia eléctrica va ligada a la temperatura que contiene el polímero, a elevada temperatura conducen mejor, por lo tanto, los plásticos se usan como aislantes eléctricos de aparatos y conducciones que se usan como corriente. (Beltran & Marcilla, 2011, p.17)

### **Propiedades Ópticas**

Esta propiedad interfiere mucho en si el polímero tiene aditivo y de la cristalización que represente, los polímeros amorfos son transparentes y los cristalinos son opacos, ya que las zonas cristalinas dispersan luz, evitando su transmisión que se convierte en translucidez u opacidad, excepto cuando se orientan o se trata de secciones muy finas, a diferencia de los polímeros amorfos, ya que su empaquetamiento al azar de las moléculas no causa difracción de la luz permitiendo una transparencia y una transmitancia a la luz que puede ser superior al 90%, la transparencia de los polímeros se puede opacar por factores como exposición a la intemperie o a cambios bruscos de temperatura. (Beltran & Marcilla, 2011, p.17)

### **Termo estabilidad**

Son los polímeros que no son aptos para un proceso de fundición mediante un calentamiento simple, ya que, la masa que lo compone es muy dura y se necesita temperaturas muy elevadas para destruirlos. (Beltran & Marcilla, 2011, p.12)

Cuando el polímero se encuentra por debajo de la temperatura de fusión es rígido y mantiene su forma y cuando está por debajo de la temperatura de transición vítrea el polímero se vuelve frágil, haciendo una similitud al vidrio cerámico. (Valencia, 2016)

**Tabla 4**

*Temperatura de fusión y transición de polímeros.*

<b>Polímero</b>	<b><math>T_f(^{\circ}\text{C})</math></b>	<b><math>T_v(^{\circ}\text{C})</math></b>
Poliétileno de baja densidad	115	-120
Poliétileno de alta densidad	137	-120
Cloruro de polivinilo	175-212	87
Polipropileno	168-176	-16
Poliestireno	240	85-125
Poliacrilonitrilo	320	107
Policarbonato	230	145
Poliéster	255	75

Fuente:(Valencia, 2016)

**Nota:** Rango de temperaturas de fusión y transición virea de polímeros.

### **Elastómeros**

Hace referencia a los polímeros que, aunque se puedan deformar, una vez que desaparece el agente que causo la pérdida de su forma puede retornar a ella, es decir, que tiene la propiedad de recuperar su forma al ser sometidos a una deformación, como es el caso del caucho vulcanizado. (Beltran & Marcilla, 2011, p. 15)

### **Termoplásticos**

Es el tipo de polímero que puede ser fundido y moldeado fácilmente si su estructura es regular y organizada, hacen parte de los cristalinos, pero si su estructura es desorganizada e irregular, se consideran amorfos. . (Beltran & Marcilla, 2011, p. 12)

### **Resinas**

Son polímeros termoestables que pasan por una transformación química cuando se funden, convirtiéndose en un sólido que al volverse a fundir se descompone. (Beltran & Marcilla, 2011, p. 12)

### **Fibras**

Tienen forma de hilos que se producen cuando el polímero fundido se hace pasar a través de unos orificios de tamaño pequeño de una matriz adecuada y se le aplica un estiramiento. (Beltran & Marcilla, 2011, p. 8)

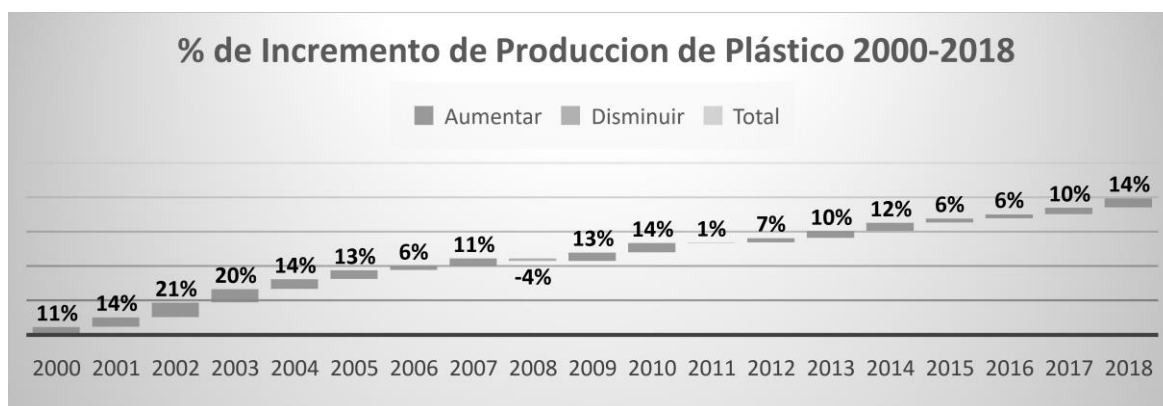
## Problemática Ambiental

### Producción mundial

La producción de plástico ha mantenido un crecimiento constante desde 1950, en dicho año se registró una producción de 1.7 millones de toneladas; luego tuvo un incremento de 13.6%, que fue el promedio anual durante 26 años. A partir de 1976, el crecimiento ha sido más moderado. (Góngora, 2014, p.2)

Para el año 2012, la producción alcanzó de nuevo un máximo histórico: 288 millones de toneladas por año, en cuanto a los datos por región arrojan una alta competitividad internacional, donde China se mantiene como el máximo productor con el 24% del total de la producción mundial, si se toma en cuenta que Japón y el resto de Asia contribuyen en conjunto con 21%, el continente asiático se está configurando como la región más importante del mundo en este rubro. Mientras tanto, Europa y América del Norte, con 20% del total de la producción cada una, representan 40% del total de la producción mundial (Góngora, 2014, p.2)

**Figura 3- Porcentaje de incremento de producción de plástico 2000-2018**



*Referencia:* ( Ministerio de Comercio- Colombia Productiva, 2019)

**Nota:** Estadísticas incremento y reducción producción de plástico a nivel mundial periodo 2000-2018.

Los datos anteriormente proyectados, están basados en el informe Colombia Productiva, del Ministerio de Comercio y DIAN. Para el periodo 2000 a 2018 la producción de plástico en Colombia tuvo un crecimiento promedio de 11.2%, el crecimiento más alto se obtuvo en el año 2002 con un porcentaje de 21%.

El crecimiento de la producción está asociado a varios factores, el plástico es un material eficiente en su uso y un recurso fundamental en la sociedad. Los cuales contribuyen al progreso social, ya que a partir de ellos se generan productos accesibles, brindando a la población oportunidad de acceder a altos estándares de vida, cuidado médicos, insumos de recreación, entre otros.

Aportan al crecimiento del país con la generación de empleos, la industria del plástico beneficia a miles de personas, por medio del acceso a un trabajo estable y adicionalmente aporta a la economía y desarrollo del país.

Los plásticos son insumos importantes para el desarrollo de proyectos, como, por ejemplo: paneles solares, turbinas de viento, accesorios automovilistas, aéreos, etc.

También son muy útiles en el sector de alimentos, ya que sirven como método de envase y embalaje para garantizar la calidad de los alimentos.

Todos los factores anteriormente mencionados contribuyen al crecimiento de la producción del plástico, por ello, nace la necesidad de modificar las propiedades contaminantes de los plásticos o implementar alternativas de sustitución que impidan el crecimiento significativo de impactos ambientales generados por plásticos.

### **Producción de plástico Año 2018 en Principales Países Vs Colombia.**

En la siguiente tabla, se realiza la representación de producción del año 2018 en países principales haciendo un comparativo a Colombia, los datos se obtuvieron de acuerdo con el plan de negocio de industria de plásticos presentado por Colombia Productiva en el año 2019. (Ministerio de Comercio- Colombia Productiva, 2019)

**Tabla 5**

*Producción de plástico año 2018 en principales países Vs Colombia*

<b>País</b>	<b>Producción 2018</b>
China	9%
Arabia Saudita	25%
India	11%
Turkey	15%
Rusia	14%
Corea del Sur	10%
Brasil	5%
Francia	7%
España	15%
Australia	8%
Canadá	12%
Japón	7%
Italia	14%
USA	15%
Germania	17%

---

Indonesia	30%
México	30%
Colombia	3%

---

**Fuente:** ( *Ministerio de Comercio- Colombia Productiva, 2019*)

**Nota:** Categorización en (%) de producción de plástico en principales países vs producción Colombia.

Como se logra evidenciar Colombia solo produce el 3% de plástico, frente a otros países, los mayores productores son Indonesia y México con el 30%.

Esta baja producción comparada con los demás países puede asociarse al desarrollo social, económico y cultural, proyectos de investigación del país, a la población y enfoques de uso.

De acuerdo con estudios realizados por Acoplasticos en Septiembre 2021, la industria del plástico creció en un 22,2% frente al primer semestre del año 2020, se estima que hay aproximadamente 3.600 empresas dedicadas a la producción del plástico, para el año 2020 los productos más demandados fueron los polietilenos tuvieron una demanda del 39%, frente a los demás plásticos, los polímeros de propileno (19,5%), los poli cloruros de vinilo (16%), las resinas de PET tuvo una demanda del (12,5%) y los poli estirenos tuvieron una demanda del 6%. (Asoplasticos, 2022)

## Enfermedades

La mayor parte del plástico inicia su vida como petróleo o gas natural, cuando se extrae el petróleo o el gas del suelo, se liberan sustancias tóxicas al aire y al agua, principalmente cuando se usa la técnica del fracking, donde se usan más de 170 sustancias cancerígenas y se generan desórdenes reproductivos, de desarrollo, o daños al sistema inmune, la población que reside cerca a los pozos de fracking se ven especialmente afectados por estas sustancias, así como por la contaminación directa de camiones diésel que transportan equipos, agua y químicos necesarios para crear un campo de fracking, una investigación realizada en EE. UU. mostró que las mujeres embarazadas que viven cerca de estos sitios tienen un mayor riesgo de complicaciones en el embarazo y de nacimientos prematuros. (Stiftung, 2019, p.6)

En el proceso de conversión de petróleo en plástico, se realiza una refinación y se divide en moléculas pequeñas, que luego son combinadas en polímeros de cadenas más largas y mezcladas con químicos bajo calor y presión para darle al material las características deseadas, los aditivos incorporados son dañinos para la salud, se escapan gradualmente, se acumulan en alimentos, en el aire y en el polvo, los niños que siempre comen almuerzos escolares son los que están más expuestos a los ftalatos (Plastificadores empleados en contenedores de alimentos. (Stiftung, 2019, p.7)

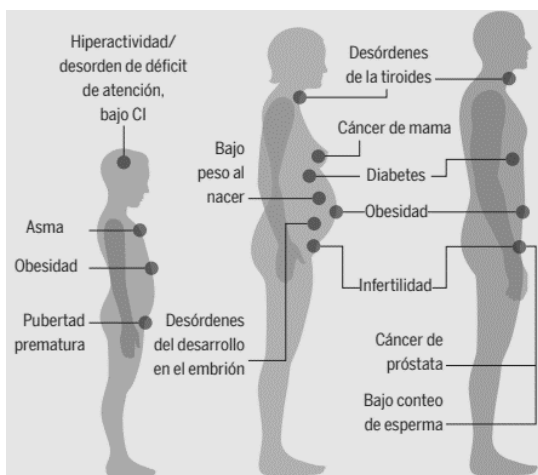
Las sustancias que funcionan como disruptores endocrinos: un grupo que incluye a muchos plastificantes, son compuestos que alteran el sistema endocrino, generan enfermedades y trastornos, como cáncer de mama, infertilidad, pubertad prematura, obesidad, alergias y diabetes. (Stiftung, 2019, p.9)

Aun no se tiene claridad a la cantidad de químicos que nos exponemos a través del consumo y como consumidores resulta virtualmente imposible identificar los químicos peligrosos en los productos (Stiftung, 2019, p.9)

En la figura 3 se muestran las posibles consecuencias para la salud que genera el contacto diario con las sustancias hormonalmente activas que se encuentran en los plásticos.

#### Figura 4

*Consecuencias para la salud generadas por plásticos.*

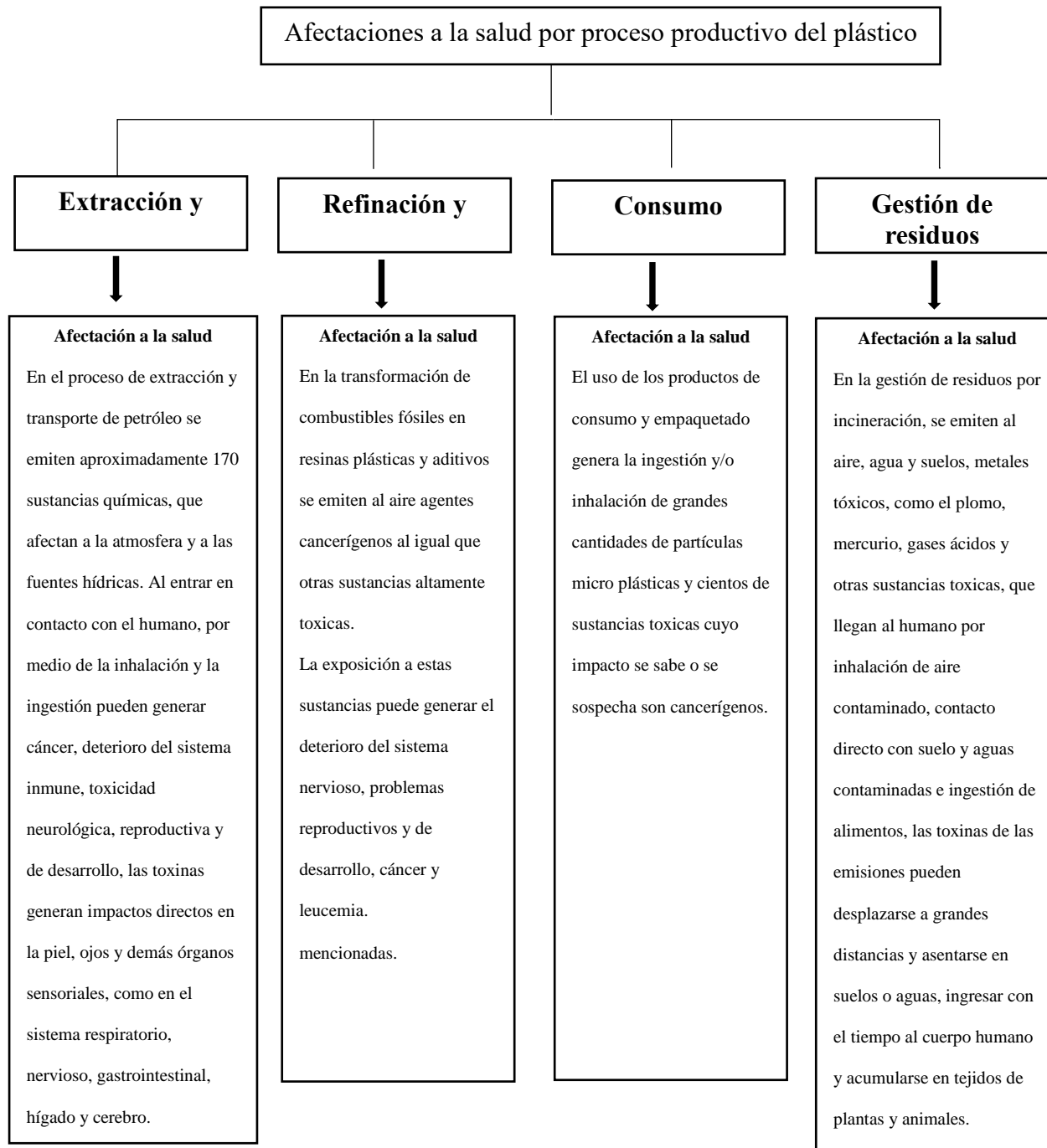


**Referencia:**(CIEL - Center for International Environmental Law, 2019)

**Nota:** Descripción de las afectaciones a la salud por cada fase productiva del plástico, concluyendo que el plástico genera afectaciones cancerígenas, cardiovasculares y enfermedades en el sistema nervioso y reproductivo.

**Figura 5**

*Afectaciones a la salud por proceso productivo del plástico*



**Referencia:** (CIEL - Center for International Environmental Law, 2019)

**Nota:** Afectaciones a la salud por proceso productivo del plástico.

## **Impacto Ambiental**

Los plásticos poseen características resistentes al entorno ambiental, por lo que son considerados impactos en los ecosistemas, principalmente por el acumulo de plásticos en el suelo y en las fuentes hídricas por factores de corriente de aire o de agua o por disposición directa en los ecosistemas. (CIEL - Center for International Environmental Law, 2019)

La creciente demanda de plásticos ha llevado inevitablemente a problemas en cuanto a la gestión de desechos, se estima que alrededor del 40% de los productos plásticos son desechados luego de 30 días, generando así, una gran cantidad de desechos plásticos que ocasionan serios problemas al entorno ambiental. (CIEL - Center for International Environmental Law, 2019)

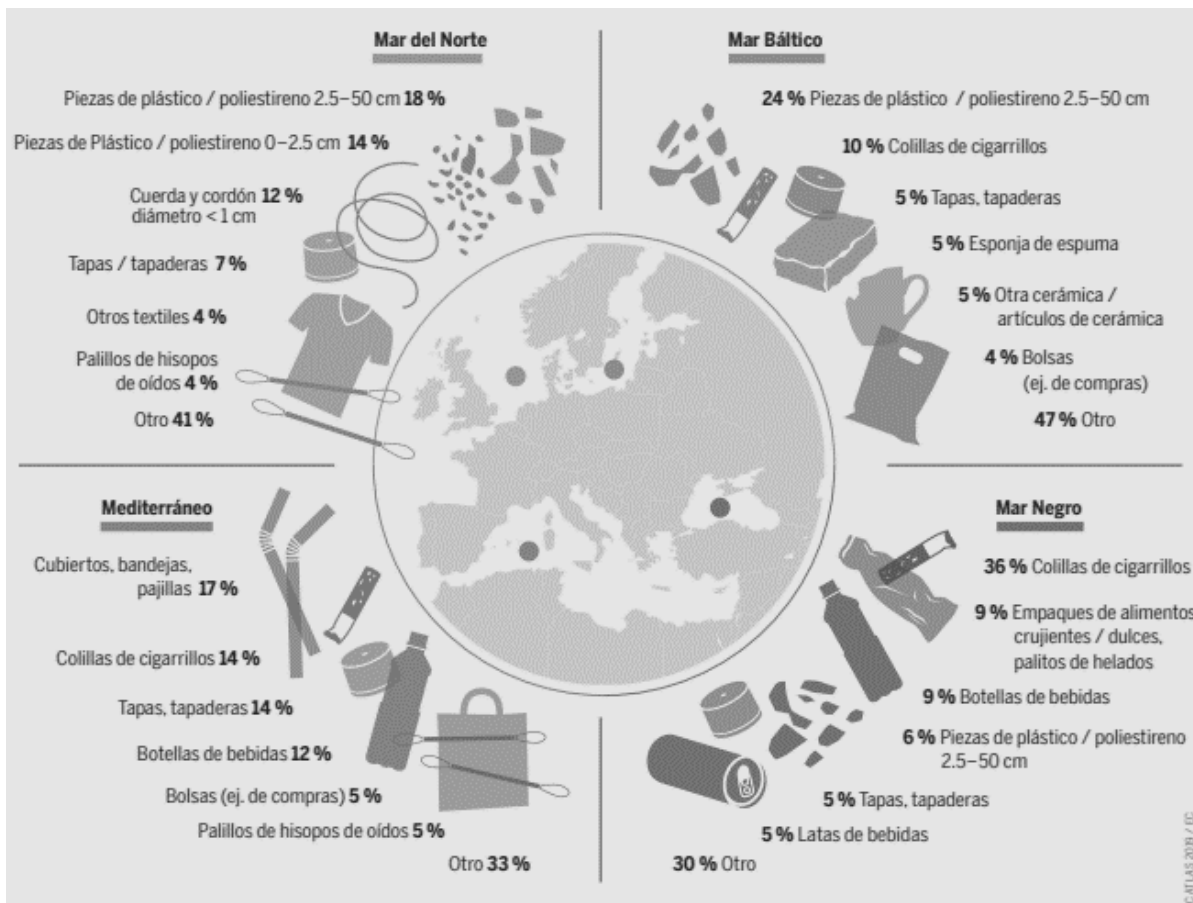
Millones de toneladas de artículos de plástico ingresan al océano cada año, transportados por ríos, descargados por desagües, arrojados o perdidos por barcos o arrastrados por las olas. (CIEL - Center for International Environmental Law, 2019)

El turismo contribuye a la problemática ambiental por plásticos, ya que en un viaje se adquieren alimentos empacados, elementos de un solo uso que finalmente son arrojados en vías, playas o fuentes hídricas. (CIEL - Center for International Environmental Law, 2019)

En la figura 6 podemos observar los principales tipos de residuos según su ubicación a nivel mundial, de acuerdo con las evaluaciones realizadas por la convención para la protección del medio ambiente marino del Atlántico del Nordeste (OSPAR), se puede evidenciar que el gran porcentaje de residuos son plásticos, en los que se encuentran tapas, bolsas, botellas, desechables y envolturas de alimentos.

**Figura 6**

*Principales tipos de basura de playa en ubicaciones seleccionadas*



**Referencia:** (CIEL - Center for International Environmental Law, 2019)

**Nota:** Estimación residuos de residuos en mar mediterráneo, negro, norte y báltico.

Cada año, unos 10 millones de toneladas de residuos plásticos terminan en los océanos, lo que equivale a una camionada por minuto. Los plásticos que terminan en el mar tienden a concentrarse en cinco enormes islas: en el Pacífico Norte y Sur, en el Atlántico Norte y Sur y en el Océano Índico. La más famosa, es la “Gran Mancha de Basura del Pacífico Norte”. (CIEL - Center for International Environmental Law, 2019)

En el mar Mediterráneo, la mayoría de los plásticos, proviene por la mala gestión de residuos y de los plásticos de un solo uso utilizados en los asentamientos costeros. En el Mar del Norte, son la pesca, la industria marina y el transporte marítimo que generan grandes cantidades de residuos. Y en el Báltico son los desechos vinculados al turismo.

Los desechos encontrados en los mares y océanos, se relaciona directamente al tipo de asentamientos que existen en sus costas y al uso mismo de sus aguas. (CIEL - Center for International Environmental Law, 2019)

La acuicultura, la pesca y el transporte marítimo son algunas de las actividades que generan los plásticos flotantes, otros provienen de la tierra: basura de las playas y micro plásticos transportados por el viento, pero la mayoría es llevada al mar por los ríos.

Las estimaciones varían: desde 0,41 millones hasta 12,7 millones de toneladas al año, las corrientes, las interacciones biológicas y la degradación hacen que paulatinamente se traslade hacia aguas poco profundas, al lecho marino o hacia las costas, cerca del 98.8% de todo el plástico ingresado al océano desde la década de 1950 se ha fragmentado y se ha hundido.

Inicialmente hay una afectación a las especies marinas por asfixia y heridas que afectan a las especies, también mueren aves que confunden los plásticos con comida y conlleva a la incorporación de tóxicos a la biomasa marina.

De acuerdo con el artículo Científico “River plastic emissions to the world’s oceans” se hace la siguiente estimación de los continentes que disponen más plásticos al mar:

**Tabla 6***Estimación de toneladas de plástico vertidas al mar*

<b>Continente</b>	<b>Toneladas de plástico vertidas al Mar/Año</b>
Norteamérica y América Central	13.400
Sudamérica	67.400
Europa	39.00
Asia	1.210.000
África	109.200
Oceanía	300

*Referencia: (Lebreton, et al., 2017, p.8)*

**Nota:** En la tabla 4 se presenta la estimación de toneladas de plástico que son vertidas al mar en un año, evidenciando que Asia es el continente que más aporte tiene a la contaminación de mares por disposición de plástico.

Teniendo en cuenta la tabla 6 se observa que el continente que mayor contaminación realiza es Asia con 1.210.000 (Ton) con un porcentaje del (86.17%).

El alto volumen de residuos plásticos que dispone Asia, se debe a que antes del año 2018 China recibía más de la mitad de las exportaciones de desperdicios de papel, metales y plástico procedentes de regiones desarrolladas, procesaba más de 45 millones de toneladas por año, el 1 de enero de 2018 China decretó una ley donde prohibió las importaciones de residuos, con el fin de proteger el medio ambiente y mejorar la salud pública, ya que el sistema de reciclaje colapso y muchos residuos terminaban vertidos en mares y ríos.

(Martin, 2020, p. 17)

Debido a esto, los demás países asiáticos se vieron afectados con esta medida, ya que, no contaban con un sistema de reciclaje y manejo de sus residuos, por lo tanto, terminaban disponiéndolos en el suelo, ríos y mares, afectando así los ecosistemas naturales.

### **Tabla 7**

#### *Estimación Residuos Plásticos Flotantes en Cuencas Oceánicas*

<b>Cuenta</b>	<b>Toneladas</b>
Pacífico Norte	95.000
Océano Indico	60.000
Atlántico Norte	55.000
Mar Mediterráneo	30.000
Pacífico Sur	25.000
Atlántico Sur	10.000

*Fuente: (Eriksen et al., 2014, p.8)*

**Nota:** Estimación de residuos plásticos flotantes en cuencas oceánicas, evidenciando que el mayor volumen de plásticos flota en el océano norte.

La cuenca que está más contaminada por plásticos es Pacífico Norte con 95.000 Toneladas, en 1997 el capitán y oceanógrafo Charles Moore realizó un recorrido al océano y evidenció el acumulo de residuos plásticos que flotaban sobre el océano que correspondían a un total de 80.000 toneladas esparcidas en 1.6 millones de  $km^2$ , los micro plásticos proceden de vertidos terrestres y residuos provenientes de pesca, como jaulas, cestas y redes. (Eriksen et al., 2014, p. 9)

## **Contaminación Atmosférica**

Esta contaminación se genera en la etapa de fabricación y en la etapa de incineración del plástico, ya que se liberan toxinas al aire, generando una degradación de la capa de ozono y así mismos problemas de salud en los habitantes.

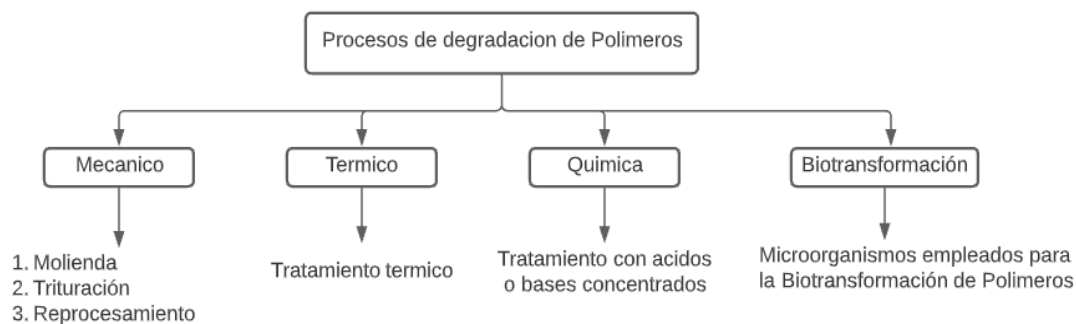
El aumento de gases de efecto invernadero (GEI), también está asociado a la producción de plástico, ya que más del 99% de los plásticos están compuestos por materias primas derivadas de combustibles fósiles, el dióxido de carbono, el metano y otros gases de efecto invernadero se liberan en cada etapa del ciclo de los plásticos, desde la extracción y el refinado de combustibles fósiles, pasando por los procesos de elevado consumo energético que producen resinas plásticas, hasta la eliminación, incineración y disposición de los residuos en los ecosistemas. (CIEL - Center for International Environmental Law, 2019)

De acuerdo con la organización sin fines de lucro Centro para el Derecho Ambiental Internacional estima que, a las tasas de crecimiento actuales y proyectadas, la producción de plásticos por sí sola podría generar 53.5 mil millones de toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> para 2050, si se agrega la incineración de los desechos se eleva este total a casi 56 mil millones de toneladas. (CIEL - Center for International Environmental Law, 2019)

## Procesos de degradación de los polímeros

**Figura 7**

*Procesos de degradación de Polímeros*



*Referencia: (Posada, 1994, p. 5)*

**Nota:** Descripción proceso de degradación de polímeros.

### Degradación Térmica

Las macromoléculas orgánicas de los polímeros son resistentes a temperaturas entre 100 °C a 200°C, si la temperatura supera el rango, las moléculas pueden descomponerse en fragmentos pequeños, debido a que las uniones son covalentes y tienen una resistencia limitada que es vencida por el calor. (Posada, 1994, p. 6)

La estabilidad térmica del material polímero depende de dos factores; inicialmente por un proceso reversible, que representa el ablandamiento del material al aumentar la temperatura, la magnitud del proceso depende de la temperatura, aunque la determinación de cambios reversibles en las propiedades incluye un factor temporal que es causado por la relajación del plástico. (Posada, 1994, p. 6)

El segundo mecanismo es la descomposición irreversible de la sustancia debido al calor. El proceso depende de la temperatura, del tiempo y si está afectado por otros factores como la atmosfera circundante. (Posada, 1994, p. 6)

Al calentarse o enfriarse el plástico se observan dos tipos de transiciones, la de primer orden, es cuando las propiedades del material cambian abruptamente, por ejemplo, el punto de fusión cristalino y la de segundo orden, es más gradual y se puede relacionar con los segmentos amorfos del polímero. (Posada, 1994, p. 6)

### **Equipos**

Para el tratamiento térmico de polímeros, se usa el incinerador, el cual tiene como objetivo reducir la masa del polímero en un 85% y el volumen en un 95%, la temperatura más alta del incinerador es de 1100 – 1500 °C, a esta temperatura se logra la esterilización de los materiales y las cenizas quedan libres de contaminantes.

Mediante esta técnica, es posible realizar recuperación energética, el cual es un proceso que utiliza los residuos como combustible para generar energía eléctrica y calefacción a través de la combustión con tecnología limpia.

### **Incineración**

#### **Combustión primaria**

En esta fase tiene una duración de 30 a 120 minutos a una temperatura de 500°C a 800°C, en esta fase, ocurren el secado, el calentamiento, la liberación de sustancias volátiles y la transformación del residuo remanente en cenizas. (Cempre, 2007)

#### **Combustión secundaria**

Los gases, vapores y material particulado, liberados en la combustión primaria, son sopladados o succionados hacia la cámara de combustión secundaria o postcombustión, allí permanecen alrededor de dos segundos expuestos a 1.000°C o más. En estas condiciones ocurre la destrucción de las sustancias volátiles y parte de las partículas.

(Cempre, 2007)

### **Degradación por radiaciones**

Las radiaciones tienen la particularidad de alterar las sustancias de varias maneras, en el caso de los polímeros, las que más afectan son las radiaciones de alta energía y la luz visible y ultravioleta, ya que en el uso de los polímeros se exponen a dichas influencias. (Posada, 1994, p. 10)

#### **Radiación de Alta Energía**

Este tipo de radiación genera cambios químicos en las sustancias orgánicas, los cambios incluyen la formación de enlaces químicos entre moléculas diferentes, división irreversible que generan la fragmentación de la molécula y desaparición de grupos no saturados; para los polímeros genera el entrecruzamiento intermolecular, mientras que la división irreversible lleva a la degradación. (Posada, 1994, p. 10)

#### **Radiación y Absorción**

La absorción en las radiaciones ocurre por la interacción con el núcleo de los átomos y las nubes electrónicas que los rodean, estas interacciones se pueden perder si las energías del fotón o cinética son inferiores a 10 MeV (Electronvoltio) y si el material irradiado está constituido por

núcleos livianos, esto ocurre con los polímeros que contienen Carbono, Oxígeno, Hidrógeno, Azufre, Nitrógeno, Azufre y Fósforo. (Posada, 1994, p. 11)

Los procesos de degradación por radiación se pueden llevar a cabo por medio de equipos como el CPC (Compound Parabolic Concentrator, el cual es un equipo que tiene la capacidad de reflejar al receptor todos los rayos que se encuentran dentro del ángulo o por medio de una cámara de envejecimiento acelerado de luz, la cual expone los materiales a ciclos alternos de luz ultravioleta y humedad al tiempo que controla altas temperaturas. (Quiroz et al, 2009, p.1)

### **Foto degradación:**

La foto degradación, es ocasionada por la radiación ultravioleta, puede realizarse de dos maneras:

**Foto degradación directa:** Se produce cuando la macromolécula absorbe directamente la radiación, y se forman radicales libres mediante la foto excitación.

**Foto degradación inducida:** Cuando la degradación de las macromoléculas es iniciada por radicales libres que han sido formados por las fotos descomposiciones de bajo peso molecular, es decir, sensibilizadores. (Hernández, 2019, p.21)

Además, la exposición de los polímeros a la radiación ultravioleta, en una atmósfera que contenga oxígeno da como resultado la fotooxidación. Los cambios casi imperceptibles, se acumulan lentamente, para conducir a efectos físicos visibles tales como cambio de color, grietas superficiales y modificación de sus propiedades mecánicas y eléctricas. Muchos de los cambios se usan para medir el grado de foto degradación oxidativa. (Hernández, 2019, p.21)

### **Envejecimiento acelerado**

El envejecimiento acelerado es un mecanismo que genera daños causados por la luz solar, la lluvia y el rocío, en pocos días o semanas, la cámara de envejecimiento acelerado, puede generar el daño que se produce de un material dejado a la intemperie durante meses o años, la cámara expone los materiales a ciclos alternos de luz UV, condensación controlada y elevadas temperaturas, simula efectos de la luz solar natural y la irradiancia artificial utilizando lámparas UV fluorescentes especiales en las porciones del espectro UVA, UVB y UVC, simula el rocío con la humedad condensada y/o spray de agua. (Lumaquin, 2020)

### **Avances científicos en biodegradación por radiaciones**

La investigación de polímeros por radiación, corresponden a proyectos de carácter educativo, se relacionan 2 ejemplos relevantes:

#### **Tesis en foto degradación de poliestireno mediante la adición de compuestos foto activadores:**

Para el desarrollo del proyecto se empleó el Poliestireno (PS). Se tomaron distintos foto activadores para incorporar el material polimérico, el cual fue puesto a una degradación mediante intemperismo acelerado. Los compuestos foto activadores elegidos fueron la Benzofenona (BPh), Antraquinona (AQ), Ácido Cítrico (AC) y Oxido de Titanio (TiO<sub>2</sub>). Las concentraciones elegidas fueron 1%, 3% y 5% peso para la BPh, AQ y AC mientras que para el TiO<sub>2</sub> fueron de 0.5%, 1% y 1.5%. Se hicieron películas que contenían más de una foto activador, tomando como constante la concentración de 3% de AC y variando las de BPh y AC. Las pruebas preliminares de radiación UV fueron hechas mediante una lámpara de mano tomando tiempos de exposición sobre las películas de 0, 2, 4, 6, 10, 12 y 26 horas. Los tiempos de exposición usados en el equipo de intemperismo acelerado QUV fueron de 0, 53, 101 y 153 horas. Se realizó la caracterización

química y física del material polimérico antes y después de la exposición UV donde se observaron sus cambios en la composición química, propiedades mecánicas y topografía del material. Todas las películas mostraron la formación del grupo carbonilo en las películas de PS, esto evaluado a través de espectrometría infrarroja (IR), donde los mayores cambios que se observaron se asociaron a que, se tenía más de un foto-activador en las películas mostrando la formación de hidroperóxidos, que no estaban presentes cuando solo era un solo aditivo. La espectrometría UV-Vis mostró el seguimiento que tenía la degradación sobre las películas, observando que cuando se tenía AC yTiO<sub>2</sub> no mostraba una aceleración en la degradación en contraparte a cuando se tenía BPh y AQ.

Se concluyó que la presencia de más de un foto-activador en la incorporación de las películas de PS promueven a la formación de hidroperóxidos, ayudando a que se formen los radicales carbonilos y lograr una fragmentación parcial del polímero. (Hernández, 2019, p.9)

### **Tesis degradación del ácido poliláctico (PLA) a diferentes dosis de radiación gamma**

En el proyecto asociado, se estudiaron los efectos producidos por la radiación gamma en el ácido poliláctico (PLA), a diferentes dosis de radiación, con la finalidad de reducir el tiempo en que se degrada este polímero. Las variaciones de la estructura fisicoquímica del PLA durante la radiación se estudiaron mediante Análisis Termogravimétrico (TGA)/ Masas, Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), Microscopia Electrónica de Barrido (MEB), Análisis dispersiva de rayos-X (EDX), Espectroscopia de Infrarrojo (FTIR), Difracción de Rayos X (DRX) y Pruebas mecánicas de dureza, elasticidad y deformación. Con Microscopía Electrónica de barrido, se observó la morfología de la superficie del PLA sin irradiar en la cual se apreció una superficie aparentemente lisa, después se observaron los cambios que tuvo el PLA al ser irradiado, donde se apreciaron los efectos de la radiación en forma de ralladuras, aglomeraciones

y pequeñas fracturas. Mediante el Análisis Dispersivo de Rayos-X; se determinó y comprobó la composición química elemental del PLA; como era de esperarse los análisis mostraron únicamente Carbono, Oxígeno e Hidrógeno. Con el TGA-Masas se determinó las temperaturas de descomposición del PLA, identificándose que los compuestos de degradación son CO, CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>. Con Espectrometría IR; permitió observar los picos principales del PLA antes y después de ser irradiado, conforme aumenta la dosis de radiación la intensidad de las bandas disminuí. También pudo apreciarse que el polímero es un material amorfo mediante Difracción de rayos-X. Las pruebas mecánicas mostraron que los valores de cada una de las pruebas disminuyen considerablemente al ir aumentando la dosis de radiación. (Castillo, 2015, p.8)

### **Degradación Mecánica**

Este tipo de degradación consiste en la fractura y deformación del polímero, generado por el efecto de fuerzas, así como los cambios químicos inducidos por los esfuerzos mecánicos.

La fabricación del polímero (Mezclado, molido, laminación, estirado, procesado, etc.) y los procesos de modificación (Corte, serruchado, limado, taladrado, torneado, fresado etc.) imponen tensiones y deformaciones, esta deformación se produce cuando el polímero se somete a fuerzas de tracción o cizalladura, en cualquier proceso los enlaces químicos se pueden romper, depende mucho del estado del material, el cual puede ser solido (Vitreo o cristalino), cauchoso y fundido. (Posada, 1994, p.12)

### **Equipos**

Para la realización de este procedimiento se usa una máquina trituradora de plástico, la cual tiene como función reducir grandes piezas de plástico, en pequeñas partículas, generalmente las trituradoras están conformadas por las siguientes partes:

**Boca de entrada:** Acceso del plástico a triturar, el tamaño está ligado al tamaño de la trituradora y a la cantidad de plástico.

**Tornillo de Arquímedes:** Se encarga del transporte del plástico al interior de la máquina.

**Motor:** Es la parte fundamental de la máquina, transforma energía, ya sea eléctrica o de combustibles fósiles.

**Rotor:** Sistema giratorio compuesto por cuchillas que se encargan de cortar y triturar el plástico.

**Tamiz:** Filtro que solo permite el paso de los trozos pequeños del plástico resultante del proceso de triturado.

(Caviedes, 2020, p.19)

### **Degradación Química**

Hace referencia a los procesos que son inducidos por el influjo de reactivos químicos (ácidos, bases, solventes, gases reactivos etc.) y que estén en contacto con los polímeros.

(Posada, 1994, p. 13)

En la exposición química, se analiza, las reacciones espontaneas, que ocurren cuando los polímeros entran en contacto con determinadas sustancias químicas, proveniente de ello, se identifican los polímeros que son más susceptibles al ataque y las sustancias que lo provocan.

(Posada, 1994, p. 13)

Las técnicas que se aplican en la biodegradación química de los polímeros son:

**Solvosís:** Funcionan en poliéster, poliamida y policarbonato, es una reacción de sustitución, en la que un disolvente funciona como nucleófilo, desempeñándose como reactivo atacante.

**Ozonolisis:** Es el ataque químico del ozono sobre los enlaces doble carbono-carbono de una molécula, el oxígeno se une a cada uno de los dos átomos de carbono que forman el doble enlace original formando aldehídos o cetonas.

**Oxidación:** Ocurre cuando los polímeros se exponen a esfuerzos cortantes, calor, luz, aire, agua, radiación o cargas mecánicas, las reacciones químicas comienzan en el polímero. Como resultado, cambiará su composición química y el peso molecular del polímero. Estas reacciones modifican las propiedades físicas y ópticas del polímero. (Posada, 1994, p. 14)

### **Biodegradación**

La biodegradación es un proceso natural que descompone un material en dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), agua (H<sub>2</sub>O) y constituyentes orgánicos, a causa de la acción enzimática de los microorganismos.

Una metodología para evaluar la biodegradación es a través de la determinación de pérdida de peso, el cual es detectado sobre el polímero, el mismo que evidencia su deterioro en su integridad, producto de un ataque microbiano.

Los microorganismos tienen un gran aporte en la descomposición del material orgánico, como los hongos, bacterias y actinomicetos, que están en varias partes de la tierra y en determinadas condiciones pueden atacar los poliésteres alifáticos, poliuretanos y poliamidas. (Arelas et al, 2020, p.2)

A pesar de que los polímeros pueden ser atacados por los microorganismos en determinadas condiciones, el uso de fungicidas y biosidas hacen a los plásticos biorresistentes, los ensayos de biodegradabilidad de los polímeros se estudian determinando la producción de CO<sub>2</sub>, el consumo de oxígeno, la pérdida de peso, el aumento de las células y practicando el examen físico de la muestra para determinar evidencias del crecimiento de la colonia y la destrucción de la muestra. (Arelas et al, 2020, p.3)

La biodegradación se da a través de procesos metabólicos y enzimáticos de los microorganismos como: bacterias y hongos, quienes secretan enzimas que se encargan de fragmentar la estructura molecular de las cadenas carbonadas en dióxido de carbono o metano.

Los microorganismos actúan en forma individual, colonias o en consorcios microbianos, desarrollando un papel importante en el ecosistema y a su vez están estrechamente relacionados con la biodegradación de plásticos sintéticos, naturales y biodegradables. Así mismo las bacterias representan un grupo importante de microorganismos que trabajan en forma multidisciplinaria sobre el polietileno y son los más abundantes de todos los organismos, estas habitan principalmente en el suelo, agua y la atmósfera, muchas especies son destacadas por su capacidad degradadora de contaminantes, para ello es importante aislarlos de sus medios y de esta forma investigar las vías metabólicas y la susceptibilidad a ataques de microbios en comparación con otros materiales degradables. (Arelas et al, 2020, p.5)

Las enzimas son causantes directas e indirectas de la oxidación biótica de plásticos, estas son secretadas por las células microbianas, las cuales catalizan la formación de una o varias reacciones en la superficie como: la oxidación, reducción, hidrólisis y esterificación; algunas de las exo-enzimas presentadas, usan oxígeno o peróxido para generar grupos carbonilo o hidroxilo en la superficie del material. (Arelas et al, 2020, p.5)

## **Factores que intervienen en la biodegradación**

Es importante tener en cuenta que la biodegradación depende de varios factores como las características del plástico, tipo de microorganismo y el pretratamiento. La biodegradabilidad de los polímeros está determinada esencialmente por diferentes e importantes características físicas y químicas como: la disponibilidad de grupos funcionales que aumentan las propiedades hidrofílicas, forma, peso, peso molecular, densidad del plástico, cantidad de regiones amorfas y cristalinas del polímero, de igual forma la complejidad estructural del plástico, composición molecular, entre otros. (Arelas et al, 2020, p.5)

## **Factores que afectan la biodegradación**

### **Cristalinidad**

Genera estabilidad térmica y química al polímero, por lo tanto, dan rigidez y resistencia mientras que los amorfos dan flexibilidad y tenacidad a los polímeros.

### **Flexibilidad de la cadena y fuerzas intermoleculares**

Hace referencia a los polímeros que son muy flexibles con fuerzas intermoleculares débiles, que dificultan su cristalización.

### **Ramificaciones**

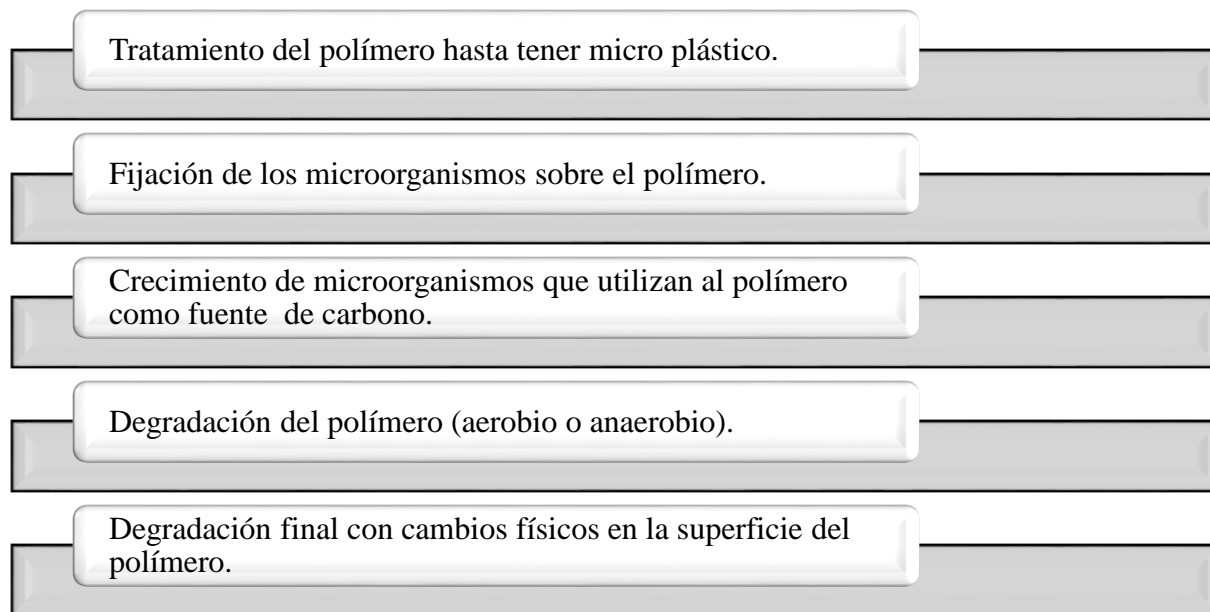
Disminuyen la estabilidad dependiendo de la longitud de estas, los polímeros ramificados se oxidan más fácil debido a que sus carbonos terciarios son susceptibles de ataque químico.

### **Entrecruzamiento**

Aumenta la rigidez del polímero y la estabilidad térmica y química. (Arelas et al, 2020, p.6).

## Figura 8

### Mecanismos de la biodegradación de los plásticos



*Referencia: (Arelas et al, 2020, p.6)*

**Nota:** Descripción proceso biodegradación de polímeros.

### Factores que influyen en el proceso de biodegradación

#### Humedad

El contenido de humedad en el sustrato tiene un efecto directo en el crecimiento de los microorganismos. La presencia de la humedad se clasifica en dos categorías: ambientes acuáticos y ambientes sólidos o secos.

(Arelas et al, 2020, p.6)

#### pH

El pH varía entre 6 a 8; sin embargo, en algunas bacterias presentan amplios rangos de tolerancia de cambio de pH de 5 a 10 con tolerancias a cambios de pH bajo y alto.

### **Temperatura**

La temperatura más apropiada es variable según al tipo de especie bacteriana que puede fluctuar, el efecto de la temperatura de desarrollo de las pseudomonas corresponde a los valores de los 2 °C hasta 55 °C en general, las bacterias termofílicas como las *Streptomyces coelicoflavus* soportan variaciones de temperaturas de 12 a 42 °C. Por otro lado, para *Pseudomonas pulida* la temperatura óptima de desarrollo es de 37 °C.

(Arelas et al, 2020, p.6)

## Enzimas

Las enzimas son moléculas de naturaleza proteica, de vital importancia en todas las reacciones bioquímicas, los polímeros que son susceptibles de ser biodegradados pueden ser naturales o sintéticos, aunque en el caso de los sintéticos varía de acuerdo con los aditivos que lo conforman. (Labeaga, 2018, p.8)

La morfología del polímero también es un factor importante que influye en la biodegradación, ya que los grupos funcionales hidrolizables han de ser accesibles para las bacterias u hongos que colonizan el polímero, los polímeros de alto peso molecular y estereoregulares son menos propensos a la biodegradación, para el caso de los polímeros entrecruzados, el grado de reticulación del polímero también influye, a mayor entrecruzamiento menor degradabilidad, ya que la enzima tiene menor acceso a los enlaces de las cadenas del polímero.(Labeaga, 2018, p.9)

Las enzimas funcionan como catalizador biológico, el cual acelera la velocidad de una reacción química específica en la célula, la enzima no se destruye durante el proceso de reacción y se puede usar varias veces. (Labeaga, 2018, p.8)

**Tabla 8**

*Descripción y funcionalidad de las enzimas*

Clase	Subclases	Proceso Químico
Oxidoreductasas	Oxidasas	Catalizan la
	Catalasas	transferencia de los
	Peroxidasas	equivalentes reductores con

---

	Deshidrogenasas	ganancia o pérdida de
	Mono oxigenasas	oxígeno e hidrogeno.
Transferasas	Peptidil-transferasas	Catalizan la
	Aminotransferasas	transferencia de grupos
	Fosfo-transferasas	funcionales de una
	Transaminasas.	molécula a otra.
Hidrolasas	Esterasas	Catalizan la
	Cutinasas	hidrólisis de moléculas
	Lipasas	transfiriendo grupos, siendo
	Glucosidasas	el H <sub>2</sub> O el aceptor de electrones.
Liasas	Liasas C-O	Catalizan la
	Liasas C-C	formación o ruptura de
	Liasas C-N	enlaces químicos, con la
	Liasas C-S	producción o eliminación de enlaces dobles.
Isomerasas	Epimerasas	Catalizan el
	Transferasas	desplazamiento de grupos
	intramoleculares	dentro de una molécula,
	Isomerasas cis-trans	reordenando la estructura atómica sin que cambie su fórmula general.
Ligasas	Ligasas C-O	

---

---

Ligasas C-C	Realizan reacciones
Ligasas C-N	de unión de moléculas
Ligasas C-S	dependientes de la energía y por ello, están acopladas a la hidrólisis de ATP.

---

*Referencia:(Niño, 2020, p.8)*

Nota: En la tabla se mencionan las clases y subclases de diferentes enzimas y se describe el proceso químico que realiza cada una en un proceso de biodegradación de polímero.

## Estado de Arte Biodegradación de Polímeros

En esta sección se expondrán diversos avances que se han realizado respecto a la biodegradación de polímeros a base de microorganismo enzimáticos:

### **Biodegradabilidad enzimática y microbiana de copolímero de poli (tereftalato de etileno) que contiene unidades nitradas**

El proyecto estuvo enfocado en la biodegradación enzimática y microbiana de homopolíesteres y poliésteres de tereftalato de etileno (PET) con un contenido de 30% en moles nitroisoftalico, se preparó una mezcla con discos de tereftalato de etileno (PET) de 5 mm de diámetro, con previa esterilización por radiación UV durante 60 min, solución al 10% (p/v) de hexafluoroisopropanol / cloroformo (1/5 v/v), la mezcla se situó en una placa Petri salinizada a temperatura ambiente.

Se realizó un cultivo en placas de agar triptona soja, durante 24 horas a una temperatura de 37°C.

*Caulerpa cylindracea* (26 U/mg) – lipasa comercial.

*M. Javanicus* (9,9 U/mg)- lipasa comercial.

*Pseudomonas fluorescens*- aislado de una muestra de agua residual.

*Bacillus subtilis*- aislado de un lodo depurador.

El ensayo de biodegradación duro 3 meses, realizados en discos usando como medio mineral una solución tampón de fosfato con pH 7,0, a una temperatura de 37°C, se usó metodología de incubación.

**Materiales y equipos:** Erlenmeyer, cajas Petri, balanza, termómetro, lámpara esterilizadora UV, incubadora de laboratorio.

### **Resultados:**

Se evidenció que los discos de PET mostraban las superficies más lisas y que la rugosidad era invariablemente más pronunciada en la superficie inferior de los discos.

Reducción de peso molecular de 30,5 mg a 27,4 mg, peso perdido: 3,11 mg.  
(Marquez, et al., 2005).

### **Estudio de la Biodegradación de PET por consorcios fúngicos II**

El proyecto estuvo enfocado en la biodegradación del tereftalato de etileno (PET) a partir de dos hongos cultivados en medio mínimo Mathur, el objetivo principal del estudio era disponer el PET como fuente de alimento de los hongos cultivados, se prepararon 16 muestras descritos a continuación:

8 matraces de 125 ml con 8 ml de medio mínimo Mathur preparado con 3 muestras de 6 mm de *cepa fúngica Rosa*, pH de 4.5, 0.1% de glucosa y 0.2g de PET pulverizado, se incubo a una temperatura de 26°C y 125 rpm durante 9 días.

8 matraces de 125 ml con 8 ml de medio mínimo Mathur preparado con 3 muestras de 6 mm de *cepa fúngica 1E*, pH de 4.5, 0.1% de glucosa y 0.2g de PET pulverizado, se incubo a una temperatura de 26°C y 125 rpm durante 9 días.

**Materiales y equipos:** Matraz de 125 ml, balanza, termómetro, incubadora rotativa.

**Resultados:****Tabla 9***Crecimiento consorcios fúngicos II*

<b>Cepa</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Diámetro Final</b>	<b>Crecimiento</b>
	<b>Inicial (mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>
1E	6	42	36
Fúngica	6	36	30

Rosa

*Referencia: (Najarro et al., 2018)***Nota:** Resultados estudio crecimiento consorcios fúngicos II

**Biodegradación Bacteriana (*Bacillus Licheniformis*) De Los UV Expuestos PET (Tereftalato De Polietileno)**

El estudio está basado en la biodegradación bacteriana del PET (Tereftalato De Polietileno), usando *Bacillus licheniformis*.

Las escamas de 0.2 mm de PET, se expusieron a la radiación ultravioleta durante 30 días, mediante luz ultravioleta (500W) con un filtro óptico (250-380 nm) a temperatura ambiente, la distancia entre las escamas de PET y lámpara era de 3 pies, luego se lavaron las escamas de PET con etanol al 70%, posterior a ello se lavaron nuevamente con agua destilada y se mantuvieron a 45°C para secar.

Finalmente, las muestras se inocularon en un medio salino mínimo que contenía *Bacillus Licheniformis*, se mantuvieron en agitador orbital durante 30 días a una temperatura de 37°C a 120 rpm.

**Materiales:** balanza, termómetro. incubadora rotativa, placas de agar nutritivos, lámpara ultravioleta 500w, con filtro óptico de 250 a 380 nm, agitador orbital, microscopio electrónico de barrido.

**Resultados:**

Crecimiento bacteriano 115g/lt en 30 días.

(Markandan & Anuradha, 2019)

**Biodegradación de Polietileno de Baja Densidad por Acción de un Consorcio**

**Microbiano Aislado de un Relleno Sanitario**

El estudio se basó en biodegradación del polietileno de baja densidad, inicialmente se realizó un proceso de aislamiento y actividad de biodegradación de microorganismos esparcidos en polietileno de baja densidad, los microorganismos se aislaron de materiales plásticos con evidencias del deterioro procedentes de un relleno sanitario en Lima, las muestras que se tomaron se filtraron y se preseleccionaron en medio de sales minerales con pH de 5.5 y 7 para hongos y bacterias; para el proceso se aislaron 6 cepas identificadas como, *Pseudomonas sp. MP3a* y *MP3b*, *Penicillium sp. MP3a*, *Rhodotorula sp. MP3b*, *Hyalodendron sp. MP3c* y una levadura no identificada, la acción degradativa del consorcio microbiano se evidenció por las variaciones en el espectro infrarrojo del polietileno con respecto al polímero sin tratamiento, se observó una reducción del índice de carbonilo (83.89% a pH 7 y 4.08% a pH 5.5), también se observó la terminación de dobles enlaces (19.77% a pH 7 y 6.47% a pH 5.5).

**Materiales:** Filtros de membrana de 0,45  $\mu\text{m}$ , balanza analítica, termómetro, incubadora, recipientes con cierre hermético, placas de agar nutritivos, Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR), pH metro.

**Resultados:**

Pérdida de peso a pH de cultivo.

5.4% a pH 7

4.8% a pH 5.5

(Uribe et al, 2010)

**Biodegradación de Polietileno de Tereftalato por Microorganismos aislados de sitios de disposición final de residuos solidos**

El estudio se enfocó en la biodegradación del Polietileno de Tereftalato, se emplearon 8 cepas microbianas, conformadas por bacilos gram negativos, bacilos gram positivos, levaduras y mohos, las cepas se inocularon por triplicado y tuvieron un periodo de incubación de 15 días a 37°C y 160 días a temperatura ambiente, como resultado se obtuvo unos cambios primarios en el aspecto físico de las láminas y en los cultivos que corresponden a quiebres y desprendimiento de la estructura, luego surgió el proceso de hidrolisis ya que, se evidencio un desgaste sobre las superficies de las láminas, las partículas del PET estaban en suspensión en los contenedores de caldos de cultivos.

**Materiales:** Tubos de ensayo, lámpara de radiación, UV incubadora, termómetro, balanza micro-analitica, lupa estereoscópica y microscópicamente microscopio óptico de campo claro Olympus CX21.

**Resultados:**

Reducción de peso (mg): 2,31 mg/ 175 días.

(Gómez & Oliveros, 2018)

## **Biodegradación de partículas micro plásticas de polietileno por el hongo *Aspergillus flavus* de las entrañas de la polilla de la cera *Gallería mellonella***

En China, se realizó un estudio de biodegradación del polietileno, por medio del hongo *Aspergillus flavus*, se tomó el polietileno de baja densidad de 0.921 g, se realizó un proceso de trituración y tres procesos de tamizaje a través de un tamiz de nailon de malla de 120  $\mu\text{m}$ , para lograr micropartículas inferiores a 200  $\mu\text{m}$ , se irradia con luz ultravioleta por 5 horas como tratamiento de esterilización, luego se preparó el cultivo y medio, los cultivos de hongos de las cepas que degradan el PE se mantuvieron en medio de caldo de dextrosa de patata (PDB), medio de agar dextrosa de patata (PDA) y medio sin carbón con medio de glucosa añadida, los experimentos de cultivo en medio líquido se realizaron en matraces de 250 ml, cada uno con 100 ml de medio, todos los matraces se cultivaron con agitación (150 rpm) a 28 ° C. La biodegradabilidad del polietileno se caracterizó por su pérdida de peso, cambio de peso molecular y cambio de suavidad de la superficie de las partículas. Los resultados indicaron que de polietileno de alta densidad (HDPE) se degradó con un peso molecular más bajo por la cepa PEDX3 después de 28 días de incubación.

**Materiales:** Tamiz de nailon de malla 120  $\mu\text{m}$ , lámpara ultravioleta, matraz de 250 ml, agitador.

### **Resultados:**

Reducción de peso molecular:  $3.9025 \pm /28$  días

(Zhang et al, 2019)

### **Degradación del polietileno lineal de baja densidad expuesto a irradiación UV**

Se aisló una bacteria mesófila capaz de degradar el polietileno (PE) y se identificó como *Chryseobacterium gleum EY1*. Se investigó el comportamiento de biodegradación de la película de PE lineal de baja densidad (LLDPE) fotodegradables en compost esterilizado antes de la inoculación con la bacteria aislada. Las películas de LLDPE se prepararon utilizando una cantidad mínima de aditivos como antioxidantes y agentes neutralizantes (los aditivos se agregaron para evitar el deterioro abrupto del polietileno durante el proceso de formación de la película) para excluir los efectos plausibles de los aditivos sobre el comportamiento de foto degradación de polietileno. Se añadieron pro oxidantes de metales de transición al polvo de LLDPE, que luego se moldeó en una película. Se examinaron las variaciones en las propiedades de tracción y el peso molecular de las películas de LLDPE en función de la intensidad de los rayos UV, el tiempo de irradiación y la temperatura. Teniendo en cuenta los resultados experimentales del termo y foto degradación de LLDPE incorporado con estearato, estearato de Mn y estearato de Fe, el último fue seleccionado como el pro oxidante más deseable para las películas de LLDPE fotosensibles. El aumento de la intensidad de la irradiación UV redujo ligeramente las propiedades de tracción y el peso molecular del PE-Fe (LLDPE con estearato de Fe), pero aumentó considerablemente la biodegradabilidad.

**Materiales:** Agitador rotatorio, matraz, refractómetro digital- Waters 150C plus, cámara ultravioleta.

**Resultado:**

Reducción de peso molecular 3,14 g/ 10 días. (Jeong & Nam, 2014)

**Degradación microbiana del polietileno de baja densidad (LDPE) por *Aspergillus clavatus* cepa JASK1 aislada de suelo de relleno sanitario**

El estudio consistió en biodegradar polietileno de baja densidad (LDPE) utilizando hongos potenciales aislados del suelo del relleno sanitario. La cepa aislada se identificó como *Aspergillus clavatus*.

Degradación de LDPE por *A. clavatus* Se controló durante 90 días de incubación en medio acuoso. La degradación fue confirmada por cambios en el peso del polietileno, CO<sub>2</sub> evolución por prueba de *Strum*, espectros infrarrojos y cambios morfológicos por análisis SEM y AFM.

**Materiales:** Tamiz de 2 mm, balanza analítica, agitador, incubadora, termómetro, kit ampure fungal DNA mini analizador genético, caja de Petri.

**Resultados:**

Pérdida de peso (%): 35% / 90 días de incubación

(Gajendiran et al, 2016)

**Biodegradación de cloruro de polivinilo por *Pseudomonas citronellolis* y *Bacillus flexus***

El objetivo de este trabajo fue estudiar las capacidades biodegradarías de cinco cepas bacterianas, a saber, *Pseudomonas chlororaphis*, *Pseudomonas citronellolis*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus flexus* y *Chelatococcus daeguensis*, hacia películas de polietileno, polipropileno, poliestireno y cloruro de polivinilo en condiciones aeróbicas. La selección preliminar resultó en la selección de *P. citronellolis* y *B. flexus* como degradadores potenciales de la película de PVC. Ambas cepas pudieron formar una biopelícula en la superficie de la película plástica y provocar algunas modificaciones en los espectros FTIR de las películas de PVC sin biomasa. Las dos cepas se utilizaron luego para preparar un ensayo de biodegradación de película de PVC en

matraces de 2 litros. Después de 45 días de incubación, se observó la fragmentación de la película, lo que sugiere que tuvo lugar la actividad biodegradativa del PVC. El análisis de cromatografía de permeación en gel mostró una reducción en el peso molecular promedio del 10% para PVC incubado con *P. citronellolis*, con cadenas de polímero de PVC aparentemente atacadas. Con base en estos resultados, al. citronellolis Se seleccionó la cepa para los ensayos de biodegradación de dos películas de PVC de desecho, utilizadas sin esterilizar o sometidas a esterilización con etanol.

**Materiales:** Matraz de 250 ml, incubadora, agitador orbital, balanza analítica.

**Resultados:**

**Reducción de peso molecular (%):** 10%/ 45 días.

(Giacomucci et al, 2019)

### **Biodegradación de polietileno desechable por hongos y *Streptomyces* especies**

El estudio se basó en bolsas de polietileno desechables que contenían un 6% de almidón, inicialmente las películas de polietileno fueron tratadas térmicamente a una temperatura de 70°C durante 10 días se desinfectaron químicamente y se incubaron y agitaron a 125 rpm a 30 ° C en un medio de extracto de levadura al 0,6% (pH 7,5) para *Streptomyces spp.* y para los hongos en medio de extracto de levadura al 3% (pH 5,5) durante 1, 2 y 4 semanas junto con un control sin inocular para cada tratamiento. Las enzimas activas provocaron cambios en las propiedades mecánicas y el peso de las películas.

**Materiales:** Caja de Petri, balanza analítica, incubadora, horno de aire forzado a 70°C, agitador.

**Resultados:**

**Reducción lamina (%):** 28.50% / 30 días- Hongos

**Reducción lamina (%):** 46.5% / 10 días – *Streptomyces*

(Shafei et al, 1997)

**Degradación de hidrocarburos aromáticos polis cíclicos (PAHS) por una bacteria consorcio enriquecido con sedimentos de manglares**

Se realizó una mezcla de hidrocarburos aromáticos poli cíclica (HAP) compuesta de fluoreno (Fl), fenantreno (Phe) y pireno (Pyr) se sometieron a la biodegradación por un consorcio bacteriano enriquecido a partir de sedimentos de manglares en condiciones libres de sedimentos y lodos de sedimentos. El consorcio enriquecido formado por tres cepas bacterianas, *Rhodococcus sp.*, *Acinetobacter sp.* y *Pseudomonas sp.*, tuvo una buena capacidad de degradación de PAH con 100% de degradación de Fl y Phe en medio líquido libre de sedimentos después de 4 semanas de crecimiento. Los porcentajes de degradación de Fl y Phe en la suspensión de sedimentos fueron más altos que en el medio líquido. Los microorganismos autóctonos en sedimentos también poseían una capacidad satisfactoria de degradación de PAH y los tres PAH se degradaron casi por completo después de 4 semanas de crecimiento. La bioaumentación (inoculación del consorcio enriquecido a los sedimentos) mostró un efecto positivo sobre la biodegradación de los PAH después de 1 semana de crecimiento. La biodegradación completa del pireno llevó más tiempo que la del Fl y el Phe, lo que indica que el consorcio de bacterias enriquecidas tenía preferencia por utilizar HAP de bajo peso molecular.

**Materiales:** Triturador de plástico, tamizador, matraz cónico, agitador orbital, alícuota.

**Resultados:**

% de Biodegradación: 100%/4 semanas.

( Yu et al, 2004)

### **Biodegradabilidad de materiales plásticos biodegradables / degradables en condiciones aeróbicas y anaeróbicas**

Se realizó un estudio sobre dos tipos de materiales plásticos, para evaluar su biodegradabilidad en condiciones aeróbicas y anaeróbicas. Para condiciones aeróbicas, se compostaron fracciones orgánicas de desechos sólidos municipales. Para el proceso anaeróbico se utilizó inóculo anaeróbico de una planta de tratamiento de aguas residuales. Se utilizaron papeles de filtro de celulosa (CFP) como control positivo para ambos medios. El proceso de compostaje fue monitoreado en términos de temperatura, humedad y sólidos volátiles y la biodegradación de las muestras fue monitoreada en términos de pérdida de masa. Los resultados del monitoreo mostraron una biodegradación del 27,1% en base seca para el plástico MB en un período de 72 días después del compostaje. Se controló la biodegradabilidad en un ambiente anaeróbico en términos de producción de biogás.

**Materiales:** Matraz cónico 1 lt, agitador de laboratorio, balanza analítica, caja de Petri, termómetro.

Resultados:

Pérdida de masa (%): 27.1%/ 72 días.

(Mohee et al, 2007)

**Degradación enzimática de poli (tereftalato de etileno): hidrolización rápida utilizando una hidrolasa de T. fusca**

Se usaron dos (2) muestras de PET, se caracterizaron por sus propiedades térmicas mediante calorimetría de barrido diferencial, las muestras aproximadamente de (5-7 mg) se calentaron en una atmósfera de nitrógeno a una velocidad de calentamiento / enfriamiento de 108C - min. Se ejecutaron tres ciclos para cada muestra (primera ejecución de calentamiento, una ejecución de enfriamiento y luego una segunda ejecución de calentamiento).

Puntos de fusión ( $T_{metro}$ ), temperaturas de transición vítrea ( $T_{gramo}$ ), las entalpías del pico de cristalización (DHC) y entalpías de fusión ( $DH_{metro}$ ) de la primera serie de DSC.

Para las mediciones de DSC, las películas utilizadas se prepararon mediante prensado en fusión seguido de enfriamiento rápido hasta temperatura ambiente. Para las muestras de PET, se pudo observar un pico de cristalización significativo en el primer ciclo de calentamiento, mientras que en el segundo ciclo de calentamiento este pico desapareció. Las películas de PBT y PHB no mostraron pico de cristalización, ni siquiera en el primer ciclo de calentamiento. Al aplicar el material original de la botella de bebida (material PET-G), que no se procesó mediante prensado en fusión en películas, no se pudo observar ningún pico de cristalización nuevamente.

Para los experimentos de degradación, se prepararon películas circulares (12mm de diámetro; masa aproximada: 20-25 mg) de los materiales mediante prensado en fusión utilizando una prensa hidráulica calentada cada película se lavó con etanol y luego se colocó en un vial de vidrio de 10 ml que contenía 5 ml de tampón fosfato.

La degradación fue se inició mediante la adición de la solución de enzima (0,5 mg de proteína por matraz de prueba) Los viales se colocaron en un agitador rotatorio (50 rpm) y se termos atizaron a 55°C. 8C (también a 40 8C para PsL, que es la temperatura óptima para la actividad enzimática).

Después de cada semana de incubación, todo el tampón de fosfato con la enzima se reemplazó por tampón y enzima nuevos. Para las pruebas en blanco, las películas se colocaron en el tampón sin adición de enzima y se incubaron en las mismas condiciones que las otras muestras.

Después de la incubación, las películas se lavaron con agua y etanol y se secaron durante la noche a 50°C. 8C. La degradación se determinó como pérdida de peso.

**Materiales:** Vial de vidrio, matraz, agitador rotatorio, tampón de laboratorio, incubadora, balanza analítica.

**Resultados:**

Pérdida de peso (mg): 10 mg / 3 semanas

Equivalente al 50% de su peso inicial.

(Joachim et al, 2005)

**Biodegradación de un copoliéster sintético por microorganismos aeróbicos mesófilos**

Se desarrolló un procedimiento de selección para evaluar la biodegradabilidad del copoliéster en condiciones ambientales y para investigar el mecanismo de biodegradación.

Los resultados mostraron que el copoliéster alifático-aromático podría ser degradado por varios microorganismos diferentes. Sin embargo, después de 21 días de exposición incluso a los cultivos más prometedores de microorganismos puros, sólo se logró una degradación parcial del Eco Flex- y sólo unas pocas muestras mostraron signos visibles de degradación, según se define vagamente por el debilitamiento mecánico de las películas. La pérdida de peso no fué tan obvia como la degradación visual y sugirió tipos más amplios de ataque microbiano. Las bacterias estudiadas degradaron preferentemente los enlaces entre los componentes alifáticos del

copolímero y la velocidad de biodegradación de los oligómeros fue apreciablemente más rápida que la de las cadenas de polímero.

**Materiales:** Matraz de agitación, agitador de incubadora rotatoria, congelador de baja temperatura, viales de laboratorio, caja de Petri, autoclave.

**Resultados:**

Reducción de peso: 16 mg/ 3 semanas

(Trinh et al, 2008)

**Biodegradación de polietileno de baja densidad (LDPE) por cultivo mixto de *Lysinibacillus xylanilyticus* y *Aspergillus niger* en suelo**

En el estudio se usaron las dos cepas de *Aspergilo sp.* y *Lisinibacilo sp.* con notable capacidad para degradar el polietileno de baja densidad (LDPE) se aislaron de los suelos de los vertederos en Teherán mediante el uso de cultivos de enriquecimiento y procedimientos de selección.

El proceso de biodegradación se realizó durante 126 días en suelo utilizando películas de LDPE puro irradiadas con UV y sin UV sin aditivos pro oxidantes en presencia y ausencia de cultivos mixtos de microorganismos seleccionados. El proceso fue monitoreado midiendo la población microbiana, el carbono de la biomasa, el pH y la respiración en el suelo, y las propiedades mecánicas de las películas. Las mediciones de dióxido de carbono en el suelo mostraron que la biodegradación en los tratamientos no inoculados fue lenta y fue de aproximadamente el 7,6% y el 8,6% de la mineralización medida para el LDPE no irradiado con UV e irradiado con UV, respectivamente, después de 126 días.

Por el contrario, en presencia de los microorganismos seleccionados, la biodegradación fue mucho más eficiente y los porcentajes de biodegradación fueron 29,5% y 15,8% para las películas irradiadas con UV y no irradiadas con UV, respectivamente. El porcentaje de disminución del índice de carbonilo fue mayor para el LDPE irradiado con UV cuando la biodegradación se realizó en suelo inoculado con los microorganismos seleccionados.

**Materiales:** Extrusora de plástico, tubos de ensayo, matraz, agitador rotatorio, termómetro, lámparas de 55 w (osram), incubadora, frascos desecadores, vaso precipitado, balanza analítica.

### **Resultados**

% de biodegradación con irradiación UV: 29,5 %/ 126 días

% de biodegradación sin irradiación UV: 15,8 %/ 126 días.

(Esmaeili et al, 2013)

## Revisión de Artículos Científicos Asociados a la Biodegradación de polímeros

**Tabla 10**

### *Revisión de Artículos Científicos Asociados a la Biodegradación de Polímeros*

Año	Nombre	Ciudad	Enzima	Polímero	Características	Pretratamientos	Metodología	VARIABLES	Resultados	Tiempo	Referencia
2005	Biodegradabilidad enzimática y microbiana de copolímeros de poli (tereftalato de etileno)	Barcelona, España	<i>Cylindrocapsa</i>	Polietileno de Tereftalato (PET)	Temperatura: 37°C pH: 7.0 Presentación de la muestra: Disco de 5mm de diámetro	Esterilización por radiación UV durante 60 min. Mezcla con solución al 10% (p/v) de hexafluoroisopropanol / cloroformo (1/5 v/v).	Incubación	Pérdida de Peso	Peso inicial: 30,55mg Peso final: 27,44 mg Peso perdido: 3,11 mg	90 días	(Soledad et al, 2005)
	Estudio de la degradación de PET por consorcios fúngicos II	Guanajuato; México	<i>Cepa Fúngica</i> <i>IE</i> <i>Cepa Fúngica</i> <i>Rosa</i>	Polietileno de Tereftalato (PET)	Temperatura: 26°C pH: 4.1 Presentación de la muestra: 0.2 de PET pulverizado	No se realizó pre-tratamientos	Incubación	Crecimiento de hongos tomando como fuente de alimento 0.2 g de tereftalato de etileno (PET) pulverizado.	Crecimiento de cepa fúngica IE: 36mm/ 9 días. Diámetro inicial: 6 mm Diámetro final: 42 mm Crecimiento de cepa fúngica rosa: 30mm/ 9 días. Diámetro inicial: 6 mm Diámetro final: 36 mm	9 días	(Najarro et al 2018)

2019	Biodegradación Bacteriana (Bacillos Licheniformis) De Los UV Expuestos Pet (Tereftalato De Polietileno)	India	<i>Bacillos Licheniformis</i>	Polietileno de Tereftalato (PET)	Presentación de la muestra: escama de 0,2 mm Temperatura: 37°C Agitación continua: 120 rpm	Exposición a radiación UV: 30 días mediante luz ultravioleta (500W)	Incubación	Crecimiento bacteria no	115g/lit / 30 días	30 días	(Markandan & Anuradha, 2019)
2010	Biodegradación de polietileno de baja densidad por acción de un consorcio microbiano aislado de un relleno sanitario, Lima, Perú	Lima, Perú	<i>Pseudomonas</i> <i>Penicillium</i> <i>Rhodotrypa</i> <i>Hyaloderma</i> <i>Levadura</i> <i>no identificada</i>	Polietileno de Baja Densidad	pH de 5,5 a 7,0	filtración y preselección en medio de sales minerales con pH de 5.5 y 7 para hongos y bacterias	Incubación de microorganismos	% de Biodegradación a pH del cultivo	5,4% a pH 7,0 4,8% a pH 5,5	60 días	(Uribe et al, 2010)
2018	Biodegradación de Polietileno de Tereftalato por Microorganismos aislados de sitios de disposición final de residuos solidos	Táchira, Venezuela	<i>Bacillus Gram Positivo</i> y <i>Negativos</i>	Polietileno de Tereftalato (PET)	Incubación de 15 días a 37°C y 160 días a temperatura ambiente	Esterilización : radiación UV (30 min)	Caldo de Cultivo	Reducción del peso (mg)	2,31 mg/175 días	175 días	(Gómez & Oliveros, 2018)

2019	Biodegradación de partículas microplásticas de polietileno por el hongo <i>Aspergillus flavus</i> de las entrañas de la polilla de la cera <i>Galleria mellonella</i>	China	<i>Aspergillus flavus</i>	polietileno de baja densidad	Presentación de la muestra: polietileno de baja densidad 0.921 g cultivo con agitación (150 rpm) a 28 ° C.	Proceso de trituración y tres procesos de tamizaje a través de un tamiz de nailon de malla de 120 µm, para lograr micropartículas inferiores a 200 µm, se irradia con luz ultravioleta por 5 horas como tratamiento de esterilización	Cultivo de microorganismos	Reducción del peso molecular	3.9 mg ± /28 días	28 días	(Zhang et al, 2019)
2013	Degradación del polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) expuesto a irradiación UV	Corea	<i>Chryseobacterium</i>	Polietileno	Temperatura: 200°C Presentación de la muestra: Disco de 100mm de diámetro	Aplicación de aditivos y agentes antioxidantes	Inoculación con radiación UV	Reducción del peso molecular	3,14 g de CO2/g	10 días	(Jeong & Nam,2014)
2016	Degradación microbiana del polietileno de baja densidad (LDPE) por <i>Aspergillus clavatus</i> cepa JASK1 aislada de suelo de relleno sanitario	India	<i>Aspergillus clavatus</i>	Polietileno	Temperatura: 25-30 °C Presentación de la muestra: Tiras	Esterilización con etanol al 70%	Incubación	Reducción del peso	35% / 90 días	90 días	(Gajendiran et al, 2016)

2019	Biodegradación de cloruro de polivinilo por <i>Pseudomonas citronellolis</i> y Bacillos flexus	Bolonia/ Italia	<i>Pseudo monas citronell olis</i>	cloruro de polivinilo	Temperatura: 4°C Presentación de la muestra: Películas de plástico de cm2 Agitación continua 150 rpm	Tres lavados con agua destilada estéril. Lue	Incubación	Reducci ón del peso	153,42 µg /mg de película de PVC	45 días	(Giacomucci et al, 2019)
1997	Biodegradación de polietileno desechable por hongos y <i>Streptomyces</i> especies	Egipto	<i>Strepto myces</i>	Polietileno	Temperatura: 45°C Presentación de la muestra: Tiras de plástico.	Tratamiento termico a una temperatura de 70°C durante 10 días desinfección química e incubación y agitaron a 125 rpm a 30 °C.	Cultivo de microorga nismos	Reducci ón de largo de lamina	Reducción lamina (%): 28.50% / 30 días- Hongos Reducción lamina (%): 46.5% / 10 días - <i>Streptomyces</i>	30 días- 10 días - <i>Strepto myces</i>	(Shafei et al, 199)
2004	Degradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHS) por una bacteria consorcio enriquecido con sedimentos de manglares	China	<i>Rhodococcus sp.</i>  <i>Acineto bacter sp.</i>  <i>Pseudo monas sp</i>	hidrocarbu ros aromáticos policíclico s (PAHS)	Presentación de la muestra: Placa Agitación orbital: 150 rpm	Trituración y tamizaje	Cultivo de microorga nismos	% de Biodegr adación	100% / 4 semanas	30 días	( Yu et, 2004)
2007	Biodegradabilidad de materiales plásticos biodegradables / degradables en condiciones	Mauricio	<i>Compos taje</i>	Bioplástico s	Temperatura: 50°C Humedad: 55% Presentación de la muestra: 0,5 a 1,0 mm materiales de	Para condiciones aeróbicas, se compostaron fracciones orgánicas de desechos	Proceso Aerobio	% de Biodegr adación	27,1% / 72 días	72 días	( Mohee et al, 2007)

	aeróbicas y anaeróbicas			compostaje consistieron en 25,5 kg de residuos de cocina, 30 kg de residuos de jardín, 2,5 kg de papel y 8,2 kg de agua.	sólidos municipales. Para el proceso anaeróbico se utilizó inóculo anaeróbico de una planta de tratamiento de aguas residuales. Se utilizaron papeles de filtro de celulosa (CFP) como control positivo para ambos medios,						
2005	Degradación enzimática de poli(tereftalato de etileno): hidrolización rápida utilizando una hidrolasa de <i>T. fusca</i>	Alemania	<i>hidrolasa de T. fusca</i>	Poliétileno de Tereftalato (PET)	Temperatura: 55°C Agitación: 50 rpm Presentación de la muestra: 5-7 mg	Proceso de lavado con etanol e inmersión en un vial de vidrio de 10 ml que contenía 5 ml de tampón fosfato	Incubación	Reducción de peso	Pérdida de peso (mg): 10 mg / 21 días Equivalente al 50% de su peso inicial.	21 días	(Müller et al, 2005)
2008	Biodegradación de un copoliéster sintético por microorganismos aeróbicos mesófilos	Canadá	<i>Mesófilos</i>	Copoliéster Sintético	Temperatura: 30°C Presentación de la muestra: 100 mm a 15 mm	No se realizó pre-tratamientos	Incubación	Reducción de peso	16 mg / 21 días	21 días	(Trinh et al, 2008)

2013	Biodegradación de polietileno de baja densidad (LDPE) por cultivo mixto de <i>Lysinibacillus xylanilyticus</i> y <i>Aspergillus niger</i> en suelo	Teheran ; Irán	<i>Lysinibacillus xylanilyticus</i> y <i>Aspergillus niger</i>	Poliétileno de Baja Densidad	Presentación de la muestra: gránulos de polietileno de baja densidad, densidad de 0,920 g/cm <sup>3</sup> , Temperatura: 30°C	No se realizó pre-tratamientos	Cultivo de microorganismos	Reducción Índice de Carbonilo	% de biodegradación con irradiación UV: 29,5 %/126 días % de biodegradación sin irradiación UV: 15,8 %/126 días	126 días	(Esmaeili et al,2013)
------	--	----------------	--	------------------------------	---	--------------------------------	----------------------------	-------------------------------	---	----------	-----------------------

**Nota:** En la tabla 9, se exponen los artículos científicos asociados a la biodegradación de polímeros con los aspectos más relevantes y significativos.

## Análisis de Resultados

Los polímeros, se han asociado a un componente biológico desde sus orígenes, ya que el primer polímero se dió a partir de la piroxilina, una celulosa de baja nitración tratada previamente con alcanfor y una cantidad mínima de disolventes de alcohol, con el paso del tiempo se fueron desarrollando más polímeros hasta convertirse en una serie de elementos importantes para el desarrollo de la humanidad, sin embargo, surgió una sociedad de consumo, que conllevó a que los plásticos se convirtieran en un problema de contaminación ambiental, desde inicios del año 1960, cuando millones de artículos plásticos llenaban los basureros, rellenos sanitarios e incineradoras del mundo.

La producción de plástico crece de una manera incontrolable, debido a que es un elemento fundamental en el desarrollo de diversas actividades económicas, industriales, agrícolas, de transporte, construcción, insumos de hogar, salud, educación y principalmente envases y embalajes.

Debido a la alta generación de residuos plásticos, los sistemas de reciclaje y los rellenos sanitarios colapsaron y millones de toneladas de plástico resultaron en mares y ríos, debido a esta problemática ambiental, surge la necesidad de crear alternativas para la eliminación del plástico de una manera en la que no afecte el entorno ambiental.

La biodegradación es una técnica muy favorable y eficiente para dar solución a la contaminación ambiental por acumulo de residuos plásticos, existen millones de proyectos documentados que apunta a que la biodegradación enzimática de polímeros es una solución viable para dar fin a la problemática mencionada.

**Tabla 11**

*Tipos de polímeros más usados en el desarrollo de estudios de biodegradación  
enzimática*

<b>Polímero</b>	<b>Numero de estudios asociados</b>
Polietileno de baja densidad	6
Polietileno de Tereftalato (PET)	6
cloruro de polivinilo	1
hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHS)	1
Copoliester Sintético	1

**Nota:** Tipos de polímeros más usados en procesos de biodegradación enzimática.

De acuerdo con la información recolectada se evidencia que el mayor número de estudios sobre biodegradación enzimática de Polímeros está asociada al Polietileno de baja densidad y al polietileno de tereftalato.

De acuerdo con la revisión bibliográfica se evidencia que el polietileno de baja densidad y el polietileno de tereftalato (PET), son los polímeros más usados para el desarrollo de proyectos asociados a la biodegrada investigación.

El polietileno de baja densidad (PEBD) es un tipo de termoplástico el cual presenta una alta demanda en el mundo ya que es utilizado para elaborar envases alimentarios y artículos no alimentarios. El PEBD se puede someter a condiciones abióticas (foto degradación, termo degradación y oxodegradación) antes del proceso de biodegradación para que este sea más susceptible de ser utilizado como fuente de carbono y energía. Existen hongos que son capaces

de producir enzimas intra y extracelulares que permiten después asimilar el PEBD dentro de la célula. (Yepes, 2014)

El PEBD no es fácil de asimilar por las enzimas; razón por la cual se realizan pretratamientos del PEBD como lo son: adición de sustancias exo-biodegradables, exposición a la luz UV y a altas temperaturas antes de la biodegradación con los microorganismos

Así, se hace posible que la molécula del PEBD sea asimilable por su cambio estructural a grupos carbonilo que son fácilmente degradables por las enzimas. (Yepes, 2014)

De acuerdo con la revisión bibliográfica, se identificó la Biodegradación de polietileno de baja densidad por acción de un consorcio microbiano aislado de un relleno sanitario en el cual se usaron las enzimas de *Pseudomonas sp.* para la biodegradación de polietileno de baja densidad, en este estudio se tuvo en cuenta como factor fundamental el pH del cultivo, se obtuvo como resultado un porcentaje de biodegradación del 5,4% a un pH 7,0 en un periodo de tiempo de 60 días, donde se puede evidencia que el proceso de biodegradación se ve afectado por los cambios de pH, este factor es bastante importante porque garantiza la supervivencia y la actividad de los microorganismos.

De igual manera dentro de la revisión realizada se identificó la Biodegradación de partículas micro plásticas de polietileno por el hongo *Aspergillus flavus*, en este estudio se evaluó la biodegradación en función de la reducción del peso molecular de una muestra de 0.921g PEBD, efectuado por el cultivo de microorganismos, el proceso de biodegradación se llevó a cabo a una agitación de 150 rpm y una temperatura de 28°C, como pretratamientos se realizó un proceso de trituración seguido de un procesos de tamizajes a través de un tamiz de 120  $\mu\text{m}$ , para lograr micro partículas inferiores a 200  $\mu\text{m}$ , se irradio con luz ultravioleta por 5 horas

como tratamiento de esterilización y se logró una reducción total de 3.9mg en un periodo de tiempo de 28 días. La gran pérdida de peso molecular cercana a un 88% en pérdida de peso se vio favorecida posiblemente gracias a la disminución de tamaño de partícula del polímero y del efecto que pudo emitir la irradiación a rayos ultravioleta.

La cuantificación de la biodegradación por medio de pérdida de peso se corrobora por el estudio realizado a él polietileno de baja densidad (LDPE) por *Aspergillus clavatus* cepa JASK1 aislada de suelo de relleno sanitario, donde tomó como variable la reducción de peso, se usó la metodología de incubación a una temperatura de 25-30°C y se realizó una esterilización con etanol al 70% previo a la incubación, el resultado fué una reducción de peso del 35% sobre el peso inicial en un periodo de tiempo de 90 días.

El efecto significativo que tienen los pretratamientos como la exposición a rayos ultravioleta se corrobora con el estudio de la degradación del polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) expuesto a irradiación UV, donde para realizar le proceso de irradiación se prepararon las películas LLDPE utilizando una cantidad mínima de aditivos como antioxidantes y agentes neutralizantes para excluir los efectos plausibles de los aditivos sobre el comportamiento de foto degradación de polietileno. Se añadieron pro oxidantes de metales de transición al polvo de LLDPE, que luego se moldearon películas, la reducción del peso molecular fue de 3,14 g en un periodo de tiempo de 10 días.

Dentro de la revisión realizada se evidencia el uso de hongos y bacterias donde se evidenció la biodegradación de polietileno desechable por hongos y *Streptomyces especies*, el polímero fue trabajado en forma de lámina, e inicialmente se realizó un tratamiento térmico a 70°C durante 10 días, luego se realizó un proceso de desinfección química.

La incubación se realizó bajo una temperatura de 30°C y una agitación continua de 125 rpm, en un medio de extracto de levadura al 0,6% y un pH de 7,5 para las *Streptomyces*, en cuanto a los hongos el pH de 5,55 y extracto de levadura al 3%. Encontrando que para los estudios realizados con hongos se obtuvo un porcentaje de biodegradación de 28.50% en 30 días y para las bacterias 46.5% / 10 días – *Streptomyces*

De igual manera se evidencia la utilización de cultivos mixtos en los procesos de Biodegradación de polietileno de baja densidad (LDPE) donde emplearon microorganismos como *Lysinibacillus xylanilyticus* y *Aspergillus niger* los cuales fueron aislados de suelos contaminados este estudio se realizó a una temperatura de 30°C, y se realizó una comparación de muestras usando y no usando irradiación UV. Donde los resultados comprueban el efecto significativo que tiene la utilización de pretratamientos como la exposición a rayos ultravioleta al obtener como resultado: % de biodegradación con irradiación UV: 29,5 %/ 126 días, % de biodegradación sin irradiación UV: 15,8 %/ 126 días. **Con el estudio realizado a la biodegradación de PET por consorcios fúngicos II** donde se realizó con dos cepas, *cepa fúngica IE* y *cepa fúngica rosa*, se confirma la utilización de consocio para la biodegradación de plásticos en este proyecto se desarrolló por medio de incubación a una temperatura de 26°C y un pH de 4.1, se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 12***Crecimiento consorcios fúngicos II*

<b>Cepa</b>	<b>Diámetro Inicial (mm)</b>	<b>Diámetro Final (mm)</b>	<b>Crecimiento (mm)</b>
1E	6	42	36
Fúngica	6	36	30

Rosa

(Najarro et al., 2018)

**Descripción:** Resultados estudio biodegradación de PET por consorcios fúngicos II

El efecto del uso de pretratamientos se corrobora con el estudio realizado a la biodegradación enzimática y microbiana de copolímero de poli (tereftalato de etileno) donde se empleó la bacteria *cilindraxe*, mediante la técnica de incubación, a una temperatura de 37°C y un pH de 7,0. Se realizó una esterilización por radiación UV durante 60 min, usando una mezcla con solución al 10% (p/v) de hexafluoroisopropanol / cloroformo (15 v/v), la variable del proceso fue la pérdida de peso en mg, se obtuvieron los siguientes resultados:

**Peso inicial:** 30,55mg, **Peso final:** 27,44 mg, **Peso perdido:** 3,11 mg en un periodo de tiempo de 90 días.

De igual manera se validó el efecto de la utilización de pretratamientos como la exposición a rayos UV donde el estudio de Biodegradación Bacteriana (Bacillos Licheniformis) de los UV Expuestos de PET por un tiempo de 30 días, donde se empleó luz ultravioleta a (500W) y se realizó un lavado de muestra con etanol al 70% con secado a 45°C, para el proceso

de incubación se incluyó la muestra en una presentación de escama de 0,2 mm, bajo una temperatura de 37°C y agitación continua de 120 rpm, el crecimiento bacteriano se corroboró crecimiento bacteriano y la pérdida de peso fue de 115g en un periodo de tiempo de 30 días.

Dentro de la revisión realizada se evidencia el uso de procesos de biodegradación con células suspendidas en caldo de cultivo donde se evaluó la biodegradación de Polietileno de Tereftalato por Microorganismos aislados de sitios de disposición final de residuos sólidos en este estudio se emplearon los microorganismos *Bacillus Gram Positivos y Negativos*, previo al tratamiento se realizó una esterilización por radiación UV de 30 minutos, posterior a ello se realizó la incubación de 15 días a una temperatura de 37°C y 160 días a una temperatura ambiente, se logró una reducción de peso de 2,31 mg en un periodo de tiempo de 175 días. Confirmando así el efecto del uso del pretratamiento exposición a UV que favorece los procesos de biodegradación de plásticos.

Dentro de la revisión realizada se evidencia que el proceso de biodegradación se realiza por medio de actividad enzimática donde el estudio realizado Degradación de poli (tereftalato de etileno) se realizó por de la hidrolización rápida utilizando una hidrolasa de *T. fusca*: se realizó la incubación a una temperatura de 55°C y agitación continua de 50 rpm, previo al proceso de incubación se realizó un lavado con etanol, se logró una reducción de peso de 10 mg en un periodo de tiempo de 21 días.

### **Microorganismos asociados a la degradación de polímeros**

De acuerdo con la revisión bibliográfica se identifican los microorganismos asociados a la biodegradación de polímeros.

**Tabla 13***Microorganismos asociados a la biodegradación de polímeros*

<b>Microorganismo</b>	<b>Número de estudios realizados</b>	<b>Microorganismo</b>	<b>Número de estudios realizados</b>
<i>Aspergillus</i>	6	<i>Levadura no identificada</i>	1
<i>Penicillium pinophilum</i>	2	<i>Bacillus Gram Positivos y Negativos</i>	1
<i>Cepa Fúngica 1E</i>	2	<i>Chryseobacterium</i>	1
<i>Pseudomonas sp</i>	2	<i>Streptomyces</i>	1
<i>cylindracea</i>	1	<i>Rhodococcus sp</i>	1
<i>Javanicus</i>	1	<i>Compostaje</i>	1
<i>Bacillos Licheniformis</i>	1	<i>T. fusca</i>	1
<i>Rhodotorula sp.</i>	1	<i>Mesófilos</i>	1
<i>Hyalodendron sp.</i>	1	<i>Lysinibacillus xylanilyticus</i>	1

**Nota:** Listado de los microorganismos asociados a la biodegradación de polímeros en base a la revisión bibliográfica.

De acuerdo con la investigación, se encontraron 18 bacterias en total que se han usado para desarrollar los estudios, la eficiencia en el proceso de degradación depende de las variables del proceso, pH, composición molecular, dimensión de la placa del polímero, entre otros; cómo se logra evidenciar la mayoría de los estudios se asocian al hongo *Aspergillus niger*.

El hongo *Aspergillus niger*, es un hongo filamentoso hialino, saprofito, perteneciente al filo Ascomiceta, (Ocampo et al, 2013)

Es un microorganismo con alta capacidad de biodegradar polímeros, por lo tanto, es tenido en cuenta en proyectos asociados a la biodegradación, debido a sus factores de crecimiento y desarrollo, condiciones ambientales y los procesos de pre- tratamiento que se le realizan al polímero antes de hacer el proceso de incubación, cultivo, según sea el caso.

El hongo interviene en el polímero, modificando propiedades de cristalinidad, resistencia, peso molecular, textura y color.

### **Variable del proceso**

#### **Pérdida de peso del polímero**

Esta variable se asocia al resultado en pérdida de peso del polímero en  $\mu\text{g}$ ,  $\text{mg}$  o  $\text{g}$ , según sea el caso, es de resaltar que esta reducción está directamente con el polímero, microorganismo asociado, la técnica empleada y a los factores de ambiente y proceso.

Para el caso de la biodegradación del Polietileno de Tereftalato (PET) mediante el uso del microorganismo *cylindracea*, la variable del proceso estuvo asociada a la pérdida de peso en  $\text{mg}$ , equivalente a 3.11  $\text{mg}$  reducidos en un intervalo de tiempo de 90 días, cuyos factores de incubación estuvieron entorno a la temperatura que debía ser de  $37^{\circ}\text{C}$  con un  $\text{pH}$  de 7.0.

Los datos se obtuvieron a partir de la toma de datos del peso inicial de la muestra de polímero comparados con el peso final, luego de 90 días de incubación, es importante aclarar que se tuvo un pretratamiento mediante la esterilización por radiación UV durante 60 min, este proceso interfiere en el polímero no solo a manera de esterilización, sino que también puede influir en cambios físicos que hicieron más fácil el proceso de asimilación del PET en los microorganismos.

Para el caso de la biodegradación del Polietileno de Tereftalato (PET) por medio de caldo de cultivo de los microorganismos *Bacillus Gram Positivos* y *Negativos*, se logró una reducción de peso de 2.31 mg en un intervalo de tiempo de 175 días, se desarrolló por método de incubación de 15 días a una temperatura de 37°C y 160 días a temperatura ambiente, se obtuvo un pretratamiento por medio de radiación UV durante 30 min, este proceso interfiere en el polímero no solo a manera de esterilización, sino que también puede influir en cambios físicos que hicieron más fácil el proceso de asimilación del PET en los microorganismos.

En la biodegradación enzimática de poli (tereftalato de etileno) utilizando una hidrolasa de *T. fusca*: se obtuvo una reducción de peso de 10 mg en un periodo de tiempo de 21 días, es decir la mitad de su peso inicial, se realizó un proceso de incubación con una temperatura de 55°C, agitación continua de 50 rpm (revoluciones por minuto), tuvo un pretratamiento que consistió en un proceso de lavado con etanol e inmersión en tampón fosfato, considero que el proceso de pretratamiento favoreció el resultado que se obtuvo, ya que, el etanol influye drásticamente en las características del plástico porque afecta la textura y el grosor del material y el tampón fosfato es una solución acuosa y salina que contiene cloruro sódico, fosfato sódico, cloruro de potasio y fosfato de potasio, estos componentes también pudieron generar reacciones químicas en la estructura del polímero.

En la biodegradación de un copoliéster sintético por microorganismos aeróbicos *mesófilos*, se realizó un proceso de incubación a una temperatura de 300°C, la reducción del peso fue de 16 mg en un intervalo de tiempo de 21 días, este proyecto tiene una particularidad frente a los demás y es que no se realizó un pretratamiento, es una observación muy llamativa ya que el resultado obtenido fue el más eficaz frente a los demás proyectos asociados a la variable de pérdida de peso.

### **% de biodegradabilidad**

Esta variable se asocia al resultado en % de biodegradabilidad de acuerdo con el peso o a la medida, es de resaltar que esta reducción está directamente con el polímero, microorganismo asociado, la técnica empleada y a los factores de ambiente y proceso

En el proceso de biodegradación de polímero de baja densidad por acción de un consorcio microbiano *Pseudomonas sp.*, se realizó un proceso de incubación en un periodo de tiempo de 60 días, el estudio se enfocó directamente en el pH del consorcio microbiano, se obtuvo como resultado un % de biodegradabilidad del 5.4% bajo un pH de 7,0.

En la degradación microbiana del polietileno de baja densidad (LDPE) por *Aspergillus clavatus*, se realizó un proceso de incubación bajo una temperatura de 25 a 30°C, se efectuó un pretratamiento por medio del lavado de la muestra con etanol a una concentración del 70%, los resultados arrojaron una reducción de peso del 35% sobre su peso inicial en un periodo de tiempo de 90 días, es posible que el lavado con etanol haya facilitado el proceso de biodegradación, ya que, el alcohol afecta algunas características fisicoquímicas de los polímero, representando un daño en su textura.

En el proceso de degradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHS) por una bacteria *Rhodococcus sp*, se realizó un cultivo de microorganismos, se ensayó con una pequeña placa de polímero, con una agitación orbital, previo al cultivo se realizó un proceso de trituración y tamizaje, el proceso tuvo un resultado exitoso, ya que se logró biodegradar el 100% del polímero en un periodo de 4 semanas, este proceso es demasiado atractivo ya que logro cumplir con el 100% de la biodegradación, considero que el éxito del resultado estuvo asociado a que la

muestra era muy pequeña y a que con los procesos de trituración y tamizaje hizo más fácil el proceso de biodegradación.

## Identificación de avances investigativas entorno a la degradación de plásticos

### España

**Proyecto Recover:** Es un proyecto proveniente de España, financiado por la Unión Europea, agrupa desde el año 2020 a 17 socios de siete países europeos para, en cuatro años, hallar posibles soluciones al problema de la contaminación del suelo mediante la transformación de los plásticos en biofertilizantes o en productos similares biodegradables, es liderado por la microbióloga María José López, el proyecto busca degradar los residuos a partir de cocteles de insectos, gusanos y microbios capaces de convertir los plásticos no reciclables en bioproductos o eliminarlos del suelo.

La metodología está enfocada en la combinación de distintos microorganismos, insectos y lombrices como herramientas biotecnológicas. Los insectos y las lombrices, con los microorganismos de sus sistemas digestivos y las enzimas que producen, actúan de forma colaborativa, transforman buena parte de esos plásticos en componentes para la extracción de quitina, un ingrediente para plásticos biodegradables, otra estrategia es que el mismo proceso, a partir de los excrementos de los insectos y lombrices, así como del lecho utilizado para su desarrollo a expensas de los plásticos, genere biofertilizantes, los mismos organismos se utilizarán también para eliminar los contaminantes presentes en el abono agrícola y que se terminan incorporando al suelo.

Los ensayos han conseguido reducciones de hasta un 20% del peso de los plásticos entre tres y cuatro meses.

El proyecto desarrollara:

Enzimas, desarrolladas mediante un enfoque de biología sintética.

Consortios microbianos que atacan los residuos plásticos mezclados en diferentes condiciones ambientales.

Insectos y lombrices de tierra cuya capacidad natural para ingerir y digerir plásticos se potenciará reforzando su microbiana natural con prebióticos.

### **Escenarios de tratamiento**

Estos procesos biotecnológicos se desarrollarán en dos escenarios: el tratamiento ex situ en cámaras de cría de insectos o reactores de compostaje para plásticos no reciclables procedentes de residuos sólidos urbanos o residuos plásticos agrícolas; y el tratamiento in situ directamente en suelos contaminados con plásticos, como las películas de acolchado.

(Agroinformacion, 2021)

### **México**

#### **Desarrollo de enzima para degradar plásticos**

La investigación fue realizada Amelia Farrés González Sarabia y Carolina Peña Montes del Departamento de Alimentos y Biotecnología (DAyB) de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México- UNAM.

La metodología consistió en aislar genes del hongo *Aspergillus nidulans*, es un microorganismo Fito patógeno, que sirven para producir la enzima cutinasa, para penetrar la cutícula de las plantas e infectarlas, posterior a ello se introdujeron en la levadura *Pichia pastoris*, para producir cutinasa en mayores cantidades y probar así, su actividad en la degradación de plásticos, la degradación funciona a temperatura ambiente y solo funciona en plásticos que tienen

en su formulación química enlaces éster, como lo son el tereftalato de polietileno (PET), el ácido poli láctico (PLA), policaprolactona (PCL).

Para ello, los plásticos primero tienen que ser tratados térmicamente, químicamente o por molienda, después, en un medio acuoso, se pone en contacto con la enzima que rompe los enlaces éster del polímero.

Finalmente, se aplica un proceso de precipitación química y extracción líquido-líquido para recuperar únicamente los monómeros. Estos monómeros pueden volver a ser utilizados para fabricar plástico.

El proceso de biodegradación duro 15 días, sin embargo, el proyecto solo se ensayó a pequeña escala, actualmente está en proceso de desarrollo para incorporarlo a nivel industrial.

(Plastics Technology, 2019)

## **China**

### **Comunidad bacteriana marina capaz de degradar el poli (tereftalato de etileno) y el polietileno**

En abril 2021, el científico publicó en la revista Elsevier el artículo científico “Una comunidad bacteriana marina capaz de degradar el poli(tereftalato de etileno) y el polietileno” en donde se descubrió una comunidad bacteriana marina conformada por las bacterias *idiomarina*, *Marinobacter*, *Exiguobacterium*, *Halomonas*, *Ochrobactrum* que degradan eficientemente el PET y PE, se usaron métodos de cultivo y secuenciación de ARNr 16S cuantitativos absolutos, se obtuvo la abundancia correspondiente y cultivos purificados de tres cepas bacterianas que mediaron la degradación plástica, Además, se utilizó cromatografía líquida-espectrometría de

masas para demostrar aún más la degradación de las películas de PET y PE por parte de la comunidad bacteriana reconstituida, se realizaron métodos transcriptómicos para investigar el proceso de degradación del plástico y los posibles mecanismos de degradación mediados por la comunidad bacteriana reconstituida, se está realizando una investigación exhaustiva para determinar la naturaleza detallada de los productos de degradación de PE por la comunidad bacteriana, así como las enzimas asociadas, y mejorar los efectos de degradación mediante la optimización de la composición de la comunidad y la actividad enzimática. (Chaomin, 2021)

### **Proyecto BioICEP**

Proceso de triple acción para acelerar la degradación del plástico y convertirlo en biopolímeros, el proyecto combina tres tecnologías innovadoras para acelerar la degradación de los plásticos hasta niveles muy superiores a los actuales y convertirlo en nuevos productos biodegradables.

En primer lugar, procesos de desintegración mecano-bioquímica, incluida una nueva tecnología patentada basada en ultrasonidos para reducir el peso molecular de los polímeros base para facilitar la biodegradación.

En segundo lugar, digestión biocatalítica con enzimas mejoradas mediante diferentes técnicas innovativas incluyendo un screening a través de sensores fluorescentes y evolución dirigida.

Por último, consorcios microbianos desarrollados a partir de las mejores cepas individuales, que, combinadas, llevan a cabo una degradación de las corrientes de residuos plásticos mezclados altamente eficiente.

Los productos de este proceso de degradación serán empleados para la síntesis de nuevos polímeros u otros bioproductos para posibilitar la economía circular de nuevos plásticos a partir de residuos.

AIMPLAS realiza el tratamiento previo de los plásticos mediante degradación térmica asistida por microondas, despolimerización asistida mediante CO<sub>2</sub> supercrítico y extrusión reactiva para facilitar la acción enzimática y microbiana.

El proyecto está a cargo de tres centros de investigación de China, inicio en febrero 2020, y está financiado por el programa Horizonte 2020. ( Residuos Profesional, 2020)

Los demás países, han decreto leyes en contra del uso de plástico de un solo uso y en proyectos científicos para sustituir el plástico por materiales biodegradables que cumplan la función de bolsas y pitillos.

## Conclusiones

Las propiedades fisicoquímicas de los polímeros influyen significativamente en el proceso de biodegradación, debido a que los polímeros están formados por cadenas de átomos de carbono ( C) que conforman su estructura principal, existen factores que afectan el proceso de biodegradación como la flexibilidad, la temperatura de fusión y cristalización, es decir, mientras más fuerte sean las cadenas de átomos de carbono, más resistente será el polímero, el peso molecular es otro factor que juega un papel fundamental en el proceso de biodegradación aportando elasticidad a su estructura, otro factor es la temperatura de transición vítrea la cual valores cercanos a esta facilitan el proceso de biodegradación otro de los factores es la temperatura de fusión , la densidad, transparencia y como último factor y quizá el de mayor impacto es el factor de pretratamiento dado que se evidenció que se favorecen los procesos de biodegradación pulverizando el plástico hasta un Tamaño de partícula de 200 um otro pretratamiento identificado en esta revisión es la exposición a rayos UV lo que favoreció en gran medida el procesos de biodegradación hasta obtener porcentajes de degradación de un 88%.

En la revisión documental realizada, se identificaron 18 enzimas asociadas a la biodegradación de polímeros, cada una con aspectos y características diferentes, la eficacia de la biodegradación depende de las variables del proceso, pH, composición molecular, dimensión de la placa del polímero, entre otros, la mayoría de estudios de los de biodegradación enzimática, están asociados al hongo *Aspergillus niger*, el cual es un microorganismo con alta capacidad de biodegradación de polímeros, se destaca en él sus factores de crecimiento y desarrollo y las condiciones de adaptación.

Se han desarrollado avances científicos entorno a la biodegradación de polímeros, que contribuyen a una solución eficaz a la problemática ambiental por acumulación de plásticos, la

iniciativa se promueve desde diferentes países como Europa, India, China, México, EE. UU., entre otros, que han logrado la identificación, caracterización y modificación genética de microorganismos para favorecer las enzimas que se han identificado que degradan los polímeros, estos avances han llegado hasta obtener enzimas obtenidas por procesos de simulación que gracias a las grandes bases de datos que se han generado de estas enzimas ha sido posible predecir y encontrar exinas más resistentes a los cambios de temperatura, y con mayor potencial para la biodegradación de plásticos proyectos como Recover y BioICEP, generan una gran especiarías ya que están siendo estructurados para dar cobertura a la biodegradación de polímeros a grande escala.

## **Recomendaciones**

En base a los resultados de la revisión bibliográfica, se recomienda el avance a grande escala de este método de biodegradación, es decir, una vez el proyecto obtenga buenos resultados, escalarlo a un nivel industrial, de tal manera que logre la biodegradación de una mayor parte de plásticos y no finalice en el proceso experimental.

Fabricar plásticos a base de materiales biodegradables, principalmente los que son usados para procesos de empaque y embalaje ya que representan el mayor uso e impacto ambiental.

Se recomienda que cada país estructure una metodología enfocada en la prohibición de disposición de plásticos en ecosistemas acuáticos y terrestres, adicionalmente que estructuren una mesa de trabajo en la cual se logre limpiar los mares y ríos en todo el territorio y realicen inversión en plantas de biodegradación de polímeros.

## Bibliografía

Asoplasticos. (2022, 10 de Junio). Informe Plasticos 2020-2021.

<https://acoplasticos.org/AFshjuraaF47lfjbOSTNKYs4831gepsfiq57DRCFws38164LXIE MF14hqnr/uWnfRy9q/pec21/>

Beltran & Marcilla. (2011, 06 de Agosto). Estructura y Propiedades de los

Polímeros:

[https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16883/1/Tema\\_1.\\_Estructura\\_y\\_propiedades\\_de\\_los\\_polimeros.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16883/1/Tema_1._Estructura_y_propiedades_de_los_polimeros.pdf)

Cempre. (2007, 12 de Julio). Incineracion de residuos industriales:

[http://www.cempre.org.uy/docs/manual\\_girsu/parte\\_4\\_incineracion.pdf](http://www.cempre.org.uy/docs/manual_girsu/parte_4_incineracion.pdf)

Chaomin. (2021). Una comunidad bacteriana marina capaz de degradar el poli(tereftalato de etileno) y el polietileno. *Elsevier*, (12), 1-12.

Cientificos, T. (2005, 20 de Junio). Polimeros

<https://www.textoscientificos.com/polimeros/moleculas>

Comercio, C. d. (2019, 12 de Junio). Produccion Plastico Colombia.

<https://www.ccb.org.co/Clusters/Cluster-de-Comunicacion-Grafica/Noticias/2019/Julio-2019/Colombia-entierra-anualmente-2-billones-de-pesos-en-plasticos-que-se-pueden-reciclar>

Compuestos, M. P. (2017, 09 de Septiembre). Materiales Poliméricos y

Compuestos:

[https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15\\_2.html#:~:text=Los%20pol%C3%AD](https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15_2.html#:~:text=Los%20pol%C3%AD)

meros%20o%20pl%C3%A1sticos%20son,org%C3%A1nicas%20denominadas%20mon  
%C3%B3meros%2C%20o%20meros.

Desarrollo, P. d. (2020, 16 de Mayo ). Programa de las Naciones Unidas para el  
Desarrollo [https://www.in.undp.org/content/india/en/home/projects/plastic-waste-  
management.html](https://www.in.undp.org/content/india/en/home/projects/plastic-waste-management.html)

Diego Uribe, D. G. (2010, 12 de Abril). Biodegradación de polietileno de baja  
densidad por acción de un consorcio microbiano aislado de un relleno sanitario, Lima,  
Perú, *El Sevier*, (20), p. 2-15.

Elias. (2015, 11 de Diciembre). mar del plastico.  
[https://aquadocs.org/bitstream/handle/1834/10964/RevINIDEP27\\_83.pdf?sequence=1&is  
Allowed=y](https://aquadocs.org/bitstream/handle/1834/10964/RevINIDEP27_83.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Eriksen et al. (2014, 10 de Diciembre). Plastic Pollution in the World's Oceans:  
[chrome-extension://dagcmkpagilhakfdhnbomgmjdpkdklff/enhanced-  
reader.html?openApp&pdf=https%3A%2F%2Fjournals.plos.org%2Fplosone%2Farticle  
%2Ffile%3Fid%3D10.1371%2Fjournal.pone.0111913%26type%3Dprintable](chrome-extension://dagcmkpagilhakfdhnbomgmjdpkdklff/enhanced-reader.html?openApp&pdf=https%3A%2F%2Fjournals.plos.org%2Fplosone%2Farticle%2Ffile%3Fid%3D10.1371%2Fjournal.pone.0111913%26type%3Dprintable)

Escuela Colombiana de Ingenieria Julio Garavito. (2015, 16 de Marzo). Plastico.:  
[https://escuelaing.s3.amazonaws.com/production/documents/2734\\_plimeros.pdf?awsacce  
sskeyid=akiawfy3ngtfbjgciwme&signature=qqrx24iy7io1at4qix7nvqhcric%3d&expires=  
1652287020](https://escuelaing.s3.amazonaws.com/production/documents/2734_plimeros.pdf?awsaccesskeyid=akiawfy3ngtfbjgciwme&signature=qqrx24iy7io1at4qix7nvqhcric%3d&expires=1652287020)

Esmaeili et al. (2013). Biodegradación de polietileno de baja densidad (LDPE)  
por cultivo mixto de *Lysinibacillus xylanilyticus* y *Aspergillus niger* en suelo. *El Sevier*,  
(7) p.1-7.

Europapress. (2019, 08 de Junio). La contaminación de los océanos por el uso de plásticos, en 5 cifras.

<https://www.europapress.es/sociedad/noticia-contaminacion-oceanos-uso-plasticos-cifras-20190608085950.html>

Euskadi. (2021, 21 de Marzo). Microplásticos: la contaminación invisible.

[https://www.euskadi.eus/contenidos/blog\\_post/20210313\\_microplasticos/es\\_def/](https://www.euskadi.eus/contenidos/blog_post/20210313_microplasticos/es_def/)

Flores. (2021, 25 de enero). South Sustainability, *revista científica*

<https://revistas.cientifica.edu.pe/index.php/southsustainability/article/view/733/750>

Fundacion, A. (s.f.).(2021, 15 de Noviembre) Residuos plásticos que flotan en cada cuenca oceánica o marina del mundo.

<https://www.fundacionaquae.org/mar-de-plastico-el-80-de-la-basura-en-el-mar-es-plastico/>

Futuro, P. (2017, 17 de Octubre). Plastico y otras urgencia.

[https://elpais.com/elpais/2017/06/06/planeta\\_futuro/1496712752\\_102424.html](https://elpais.com/elpais/2017/06/06/planeta_futuro/1496712752_102424.html)

Gajendiran et al. (2016, 16 de Marzo). Degradación microbiana del polietileno de baja densidad (LDPE) por *Aspergillus clavatus* cepa JASK1 aislada de suelo de relleno sanitario. *springerlink*, *springerlink*, *Cientifics*, (15), p. 2-15.

Giacomucci et al. (2019, 16 de Octubre). Biodegradación de cloruro de polivinilo por *Pseudomonas citronellolis* y *Bacillus flexus*. *El Sevier*,(7), p. 1-7.

Gómez & Oliveros. (2018, 15 de Junio). Biodegradación de Polietileno de Tereftalato por Microorganismos aislados de sitios de disposición final de residuos solidos, *El sevier*,(8), p. 1-7.

Góngora. (2014,15 de Octubre). La industria del plastico en el mundo:  
[http://revistas.bancomext.gob.mx/rce/magazines/761/3/la\\_industria\\_del\\_plastico.pdf](http://revistas.bancomext.gob.mx/rce/magazines/761/3/la_industria_del_plastico.pdf)

GreenPeace. (s.f.). Produccion de plasticos:  
<https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/consumismo/plasticos/datos-sobre-la-produccion-de-plasticos/>

Gr[http://greenpeace.co/pdf/2019/gp\\_informe\\_plasticos\\_colombia\\_02.pdf](http://greenpeace.co/pdf/2019/gp_informe_plasticos_colombia_02.pdf)

Hanaa A. El-Shafei, (1997, 16 de Abril). *Biodegradación de polietileno desechable por hongos y Streptomyces especies. Cientifica*, (16), p. 1-15.

Hernández. (2019, 16 de Mayo). Instituto Tecnologico de Ciudad de Mexico:  
<http://repositorio.tecnm.mx:8080/jspui/bitstream/123456789/25/1/fotodegradaci%C3%93n%20de%20poliestireno%20mediante%20la%20adici%C3%93n%20de%20compuestos%20fotoactivadores.pdf>

J Arutchelvi, M. S. (2007, 12 de febrero). *Biodegradación de polietileno y polipropileno.El sevier*, (16), p. 1-15.

J. Hachi & J. Rodriguez. (2010, 12 de marzo). Estudio de factibilidad para reciclar envases plasticos de polietileno tereftalato:  
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/2450/20/UPS-GT000106.pdf>

Jenyfer Rocha & Duvan Peña. (2020, 16 de Noviembre). biodegradacion de tereftalato de polietileno (PET).

<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/25500/RochaNi%c3%b1oJenyferAlexsandra2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Jeong & Nam. (2014, 19 de Septiembre). Degradación del polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) expuesto a irradiación UV, *El sevier*, (15), p. 1-15.

Joachim et al. (2005, 16 de Mayo). Degradación enzimática de poli (tereftalato de etileno): hidrolización rápida utilizando una hidrolasa de *T. fusca*. *Macromolecular Rapid, Communications*, (6), p.1-6.

Labeaga. (2018, 06 de febrero). Polimeros biodegradables, importancia y potenciales aplicaciones: [http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:master-ciencias-cytq-alabeaga/labeaga\\_viteri\\_aitziber\\_tfm.pdf](http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:master-ciencias-cytq-alabeaga/labeaga_viteri_aitziber_tfm.pdf)

Lara. (2011, 12 de Septiembre). Tereftalato de polietileno- PET: <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/15405/anexo%201-pet.pdf?sequence=2&isallowed=y>

Law, C. f. ( 2019, 16 de Junio). Plastic & Health: The Hidden Costs of a Plastic Planet: <https://www.ciel.org/plasticandhealth/>

Lebreton, et al. (2017, 08 de Junio). River plastic emissions to the world's oceans: <https://www.nature.com/articles/ncomms15611.pdf>

Lucia Giacomucci, N. R. (2019, 09 de Mayo). Biodegradación de cloruro de polivinilo por *Pseudomonas citronellolis* y *Bacillus flexus*. *El sevier*, (8), p. 1-8.

Magali Ccallo Arelas (2020, 27 de Diciembre). Biodegradación de polímeros de plástico por Pseudomonas, *Cientifics*, (10), p. 1-9.

Markandan & Anuradha. (2019, 16 de Agosto). Biodegradacion Bacteriana (Bacillus Licheniformis) de los UV expuestos PET (Tereftalato de Polietileno). *Revista Internacional de Cientifico*, (5), p. 1-5.

Marques, S., Cerda, M., & PR, D. (2005, 13 de Septiembre). Biodegradabilidad enzimática y microbiana de copolímeros de poli (tereftalato de etileno) que contiene unidades nitradas. Barcelona: *Science*, (8), p. 1-8.

Marquez, et al. (2005, 16 de Agosto). Biodegrabilidad enzimatica y microbiana de copolimeros de poli (tereftalato de etileno). *Science direct*,(9), p. 1-9.

Martin. (2020, 12 de septiembre). Prohibicion China de importacio de residuos plasticos de 2018: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/43387/TFM-J-46.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Mendez, L. D. (2018, 28 de Diciembre). Estudio realizado sobre la transformación física, química y microbiológica del polietileno de baja densidad empleando plasma de Oxígeno, Fotocatálisis y Pleurotus ostreatus: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/42789/tesis%20version%20final%20%28mayo%202019%29.pdf?sequence=1&isallowed=y>

Mohee et al. (2007). Biodegradabilidad de materiales plásticos biodegradables / degradables en condiciones aeróbicas y anaeróbicas. *Science Direct*, (6), p. 1-6.

murali markandan1\*, u. s. (2019). biodegradación bacteriana (*Bacillus licheniformis*) de los UV expuestos biodegradación bacteriana (*Bacillus licheniformis*) de los UV expuestos. *revista internacional de científico reciente investigar*, (6), p. 1-6.

Ocampo et al. (2013). Un análisis del metabolismo de *Aspergillus niger*. *Revista mexicana de*

plásticos, T. d. (2011, 30 de Mayo). PET:  
<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/pet.html>

polímeros, T. d. (2017, 21 de Junio). Seminario de actualización profesional en ciencia y tecnología para la industria de los polímeros:  
<https://tecnologiadelospolimeros.wordpress.com/2017/06/21/reacciones-de-polimerizacion-por-adicion-radicalar/>

Posada. (1994, 06 de Agosto). *La degradación de los plásticos*.  
<https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/16534>

Quiroz et al. (2009, 25 de Junio). Estudio de la degradación en polímeros oxo-biodegradables.  
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5537/1/Francisco-Quiroz.pdf>

Reciclados, L. T. (2019, 12 de Mayo). Uso del plástico y sus consecuencias.  
<https://recicladoslatrinchera.com/uso-del-plastico-consecuencias/>

RenWei, T. T. (2020, 12 de Noviembre). Possibilities and limitations of biotechnological plastic degradation and recycling, *Nature Catalysis*, (15), p. 1-15.

Rubio. (2015, 30 de Junio). El sustituto del plástico está en la naturaleza.

<https://www.tecnicaindustrial.es/wp-content/uploads/Numeros/100/4204/a4204.pdf>

SH Yu, L. K. (2004, 05 de Abril). *Degradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHS) por una bacteria consorcio enriquecido con sedimentos de manglares*. Hong Kong ;China, *El sevier*, (10), p. 1-10.

Shafei et al. (1997, 06 de febrero.). Biodegradación de polietileno desechable por hongos y *Streptomyces* especies. *El sevier*, (5), p. 1-5.

Stiftung. (2019, 02 de Mayo). El atlas del plástico:

<https://co.boell.org/sites/default/files/202102/Plastic%20Atlas%202019%20cambio.pdf>

Trinh et al. (2008, 04 de Octubre). Biodegradación de un copoliéster sintético por microorganismos aeróbicos mesófilos. *El Sevier*, (7), p. 1-7.

Unidas, N. (2017, 13 de Mayo). La ONU lucha por mantener los océanos limpios de plásticos: <https://news.un.org/es/story/2017/05/1378771>

Uribe et al. (2010, 15 de Agosto). Biodegradacion de polietileno de baja densidad por accion de un concorsio microbiano aislado de un relleno sanitario.

<http://sisbib.unmsm.edu.pe/BVRevistas/biologia/biologiaNEW.htm>

Valencia. (2016, 03 de Mayo). Materiales Poliméricos y Compuestos:

[https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15\\_2.html](https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15_2.html)

Valencia. (2016, 06 de Agosto).Polimeros y compuestos:

[https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15\\_4.html](https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15_4.html)

Zhang et al. (2019, 15 de Junio). Biodegradación de partículas microplásticas de polietileno por el hongo *Aspergillus flavus* de las entrañas de la polilla de la cera *Galleria mellonella*. *El Sevier*, (8), p. 1-8.