

	GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS		CÓDIGO	FO-GS-15	
			VERSIÓN	02	
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN			FECHA	03/04/2017
				PÁGINA	1 de 1
ELABORÓ		REVISÓ		APROBÓ	
Jefe División de Biblioteca		Equipo Operativo de Calidad		Líder de Calidad	

AUTOR(ES):

NOMBRE(S): DAIRON ELIECER
NOMBRE(S): DANIELA ANDREA

APELLIDOS: ALMEYDA PIMIENTA
APELLIDOS: VARGAS ORTEGA

FACULTAD: FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y DEL AMBIENTE
PLAN DE ESTUDIOS: PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA BIOTECNOLÓGICA

DIRECTOR(ES):

NOMBRE(S): LAURA YOLIMA
NOMBRE(S): EDWIN ALBERTO

APELLIDOS: MORENO ROZO
APELLIDOS: RUIZ MURILLO

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS):

**MICROORGANISMOS CON POTENCIAL EN BIODEGRADACIÓN DE POLÍMEROS
CONTAMINANTES DEL MEDIO AMBIENTE: AVANCES Y DESAFÍOS**

El estado actual de la contaminación plástica en constante aumento es la principal preocupación de los investigadores científicos. Las técnicas convencionales aplicadas (es decir, quema y vertedero) para degradar el plástico del medio ambiente son inadecuadas debido a los subproductos nocivos y se limitan a su reciclaje. La biodegradación es una degradación enzimática que involucra a algunos microorganismos, incluidas las bacterias. Esta técnica se puede utilizar para prevenir el problema de los desechos plásticos. La biodegradación de los desechos plásticos se da a través de varios pasos, incluidos el biodeterioro, la biofragmentación y la asimilación. En este trabajo de investigación, se ha recapitulado enfoques biotecnológicos recientes, incluidos consorcios microbianos sintéticos y herramientas de biología de que pueden allanar el camino hacia la biorremediación y degradación de plásticos. Además, también se resumen los posibles microbios degradadores del plástico y sus vías de degradación. Por último, se centra en mejorar la comprensión de la capacidad de degradación de los microorganismos utilizando herramientas biotecnológicas contemporánea.

PALABRAS CLAVES: Biorremediación; Biotecnología; Contaminación; Degradación
Microorganismos.

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 84 **PLANOS:** NO **ILUSTRACIONES:** NO **CD ROOM:** NO

MICROORGANISMOS CON POTENCIAL EN BIODEGRADACIÓN DE
POLÍMEROS CONTAMINANTES DEL MEDIO AMBIENTE: AVANCES Y
DESAFIOS

DAYRON ELIECER ALMEYDA

PIMIENTA

DANIELA ANDREA VARGAS ORTEGA

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y DEL

AMBIENTE

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERIA

BIOTECNOLÓGICA

CUCUTA

2021

MICROORGANISMOS CON POTENCIAL EN BIODEGRADACIÓN DE
POLÍMEROS CONTAMINANTES DEL MEDIO AMBIENTE: AVANCES Y
DESAFIOS

DAIRON ELIECER ALMEYDA
PIMIENTA

DANIELA ANDREA VARGAS
ORTEGA

PhD. LAURA YOLIMA MORENO ROZO

PhD. EDWIN ALBERTO MURILLO
RUIZ

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y DEL
AMBIENTE
PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERIA
BIOTECNOLOGICA
CUCUTA
2021

ACTA DE SUSTENTACION DE UN TRABAJO DE GRADO

FECHA: 05 MARZO DE 2021

HORA: 08:00 A.M.

LUGAR: CUCUTA, NORTE DE SANTANDER – EVALUACION VIRTUAL

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA BIOTECNOLÓGICA

TITULO: "MICROORGANISMOS CON POTENCIAL EN BIODEGRADACIÓN DE
POLÍMEROS CONTAMINANTES DEL MEDIO AMBIENTE: AVANCES Y DESAFÍOS."

MODALIDAD: MONOGRAFIA

JURADO: LILIAN TRINIDAD RAMIREZ CAICEDO
GERMAN LUCIANO LOPEZ BARRERA
ALINA KATIL SIGARROA RIECHE

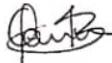
ENTIDAD: UFPS

DIRECTOR: LAURA MORENO ROZO
CODIRECTOR: EDWIN MURILLO RUIZ

NOMBRE DE LOS ESTUDIANTE	CODIGO	CALIFICACION
DAYRON ELIECER ALMEYDA PIMIENTA	1611323	4.3
DANIELA ANDREA VARGAS ORTEGA	1611329	4.3

OBSERVACIONES: APROBADO.

FIRMA DE LOS JURADOS



Lilian Trinidad Ramirez Caicedo German Luciano López Barrera Alina Katil Sigarroa Rieche



Vo. Bo Coordinador Comité Curricular _____



Vigilada Mineducación

GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS



**CARTA DE AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA
LA CONSULTA, LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y LA PUBLICACIÓN
ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO**

Cúcuta, Señores

BIBLIOTECA EDUARDO COTE LAMUS

Cordial saludo:

Nosotros, **Daniela Andrea Vargas Ortega** y **Dayron Eliecer Almeyda Pimienta** identificados con la C.C **1.090.518.083** y **1.090.523.502** respectivamente, autores de la tesis y/o trabajo de grado titulado MICROORGANISMOS CON POTENCIAL EN BIODEGRADACIÓN DE POLÍMEROS CONTAMINANTES DEL MEDIO AMBIENTE: AVANCES Y DESAFÍOS presentado y aprobado en el año 2021 como requisito para optar al título de INGENIERO BIOTECNOLÓGICO; autorizamos a la biblioteca de la Universidad Francisco de Paula Santander, Eduardo Cote Lamus, para que con fines académicos, muestre a la comunidad en general a la producción intelectual de esta institución educativa, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo de grado en la página web de la Biblioteca Eduardo Cote Lamus y en las redes de información del país y el exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad Francisco de Paula Santander.
- Permita la consulta, la reproducción, a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato CD-ROM o digital desde Internet, Intranet etc.; y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

Lo anterior, de conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la ley 1982 y el artículo 11 de la decisión andina 351 de 1993, que establece que “**los derechos morales del trabajo son propiedad de los autores**”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Dayron Almeyda Pimienta.

Dayron Eliecer Almeyda Pimienta
1.090.523.502

Daniela Vargas.

Daniela Andrea Vargas Ortega
1.090.518.083

Resumen

El estado actual de la contaminación plástica en constante aumento es la principal preocupación de los investigadores científicos. Las técnicas convencionales aplicadas (es decir, quema y vertedero) para degradar el plástico del medio ambiente son inadecuadas debido a los subproductos nocivos y se limitan a su reciclaje. La biodegradación es una degradación enzimática que involucra a algunos microorganismos, incluidas las bacterias. Esta técnica se puede utilizar para prevenir el problema de los desechos plásticos. La biodegradación de los desechos plásticos se da a través de varios pasos, incluidos el biodeterioro, la biofragmentación y la asimilación. En este trabajo de investigación, se ha recapitulado enfoques biotecnológicos recientes, incluidos consorcios microbianos sintéticos y herramientas de biología de que pueden allanar el camino hacia la biorremediación y degradación de plásticos. Además, también se resumen los posibles microbios degradadores del plástico y sus vías de degradación. Por último, se centra en mejorar la comprensión de la capacidad de degradación de los microorganismos utilizando herramientas biotecnológicas contemporánea.

Palabras Claves: Biorremediación, Biotecnología, Contaminación, Degradación, Microorganismos, Plásticos

Abstract

The present state of constantly increasing plastic pollution is the major concern of scientific researchers. The conventional techniques applied (i.e., burning and landfilling) to get plastic degraded from the environment are inadequate due to harmful byproducts and limited to its recycling. The general techniques in preventing plastic waste as landfill, incineration, recycling are considered less effective as they release some hazardous materials to the environment. Thus, the appropriate technique is needed to overcome this problem. Biodegradation is an enzymatic degradation involving some microorganisms including bacteria. This technique can be used to prevent the plastic waste problem. Plastic waste biodegradation occurred through several steps, including biodeterioration, depolymerization, and assimilation. In this review, we have recapitulated recent biotechnological approaches, including synthetic microbial consortia, systems biology tools, and genetic engineering techniques which can pave the path towards the plastic bioremediation and degradation. Moreover, potential plastic degrader microbes and their degradation pathways are also summarized. Lastly, this review focuses on enhancing the understanding of the degradation ability of microorganisms using contemporary biotechnological tools.

Keywords: Bioremediation, Biotechnology, Pollution, Degradation, Microorganisms, Plastics

Agradecimientos

Principalmente a Dios, por habernos dado la vida, por darnos una familia maravillosa, que nos han inculcado el sacrificio del esfuerzo, nos han enseñado que, a pesar de las dificultades, la solución no es desistir si no hay que seguir hacia adelante superando obstáculos y soñando que se puede lograr lo que otras personas llaman “imposible”

Agradecemos nuestros directores de proyecto, PhD. Laura Moreno Rozo y PhD. Edwin Murillo Ruiz, por aceptar ser parte de este proyecto. Gracias por su tiempo, dedicación, paciencia y por habernos brindado sus sabios consejos cada vez que necesitábamos de su ayuda, de igual forma por compartirnos las herramientas del conocimiento en las aulas de clase mientras fuimos sus alumnos

Y finalmente a todos los investigadores por sus valiosos e importantes estudios sobre la biodegradación de desechos plásticos utilizando microorganismos degradantes del plástico que citamos en esta revisión

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	12
1. Delimitación del ejercicio de investigación	14
1.1 Planteamiento del problema	14
1.2. Formulación del problema	16
1.3. Justificación	17
1.4. Objetivo general	19
1.5. Objetivos específicos	19
2. Marco Referencial	20
2.1. Antecedentes de la investigación	20
2.2. Marco Teórico	31
2.2.1 Biodegradación de Plásticos	31
2.2.2 Factores que afectan la degradación de plástico	32
2.2.3 Papel de los microorganismos en la biodegradación	33
2.2.4 El papel de las enzimas en la biodegradación	36

2.2.5. Efecto del pH en el medio	37
2.2.6 Efecto de la temperatura	37
2.3. Marco Conceptual	39
3.Hipótesis	41
4. Capítulos y Subcapítulos de la Investigación	41
4.1 Impacto de los plásticos en el ambiente y la sociedad	41
4.2 Biodegradación microbiana	42
4.3 Enzimas microbianas como papel fundamental en la biodegradación	45
4.4 Factores que afectan la biodegradación microbiana	49
4.5. Hongos, Bacterias o Actinomicetos ¿Cual posee mayor capacidad de biodegradación?	50
4.6. Avances de la Biotecnología para hacer frente a la contaminación	55
4.7. ¿Puede la Biotecnología cambiar el rumbo del plástico?	59
5.Conclusiones	63
6. Recomendaciones	64
Referencias Bibliográficas	65

Introducción

El plástico es un polímero sintético de alto peso molecular de cadena larga de hidrocarburos derivados de productos petroquímicos (Ahmed, *et al*, 2018). El rápido desarrollo de la urbanización conduce a un fuerte aumento de la demanda de productos a base de plástico. La durabilidad y el bajo costo de los productos plásticos son la principal razón para aumentar la producción del mercado y su demanda. (Basu, *et al*, 2018).

La capacidad persistente del plástico en un escenario medioambiental está provocando contaminación, por ejemplo, se estima que entre el 30% y el 40% de los plásticos se producen en todo el mundo para diferentes propósitos de envasado, aumentando directamente la basura plástica a una tasa del 12% anual (Clukey, *et al*, 2018). Por lo tanto, los científicos y ambientalistas están trabajando para desarrollar un enfoque eficiente y ecológico para reducir la contaminación plástica. La remediación del plástico por microbios es el método ecológico. Las enzimas microbianas, es decir, oxidorreductasa, lacasa y peroxidasa, pueden degradar el polímero plástico, descomponiendo los polímeros plásticos en una pequeña cadena de monómeros, atenuadores y oligómeros, que pueden pasar rápidamente a través de la membrana celular y ser utilizados por los microbios como fuente de carbono y energía (Raziyafathima, *et al*, 2016).

Las técnicas biotecnológicas modernas como la ingeniería genética, la biología de sistemas y el desarrollo de consorcios microbianos sintéticos se han aplicado para superar las limitaciones asociadas con los métodos convencionales de quema y vertedero (Sattlewal, *et al*, 2008). Las herramientas de ingeniería genética han sido útiles para la manipulación de la estructura genética de los microorganismos para el mejoramiento de su capacidad degradativa con respecto a los contaminantes plásticos (Wilkes y Aristilde, 2017). Mientras que la biología de sistemas

proporciona información relacionada con la expresión de ADN, ARN y metabolitos producidos, así como su interacción con otras moléculas durante el proceso de degradación utilizando diferentes enfoques ómicos. Más información obtenida de la biología de sistemas y el uso de la ingeniería genética, el consorcio microbiano natural ha sido manipulado en el sentido de su potencial genético para obtener una comunidad microbiana sintética (Basu, *et al*, 2018).

Este trabajo tiene como objetivo resumir, categorizar y analizar estudios recientes sobre la degradación de plásticos mediada por microorganismos y discutir las características y mecanismos asociados a la de degradación de estos.

1. Delimitación del ejercicio de investigación

1.1 Planteamiento del problema

Según un estudio publicado en 2012, aproximadamente 165 millones de toneladas de plástico estaban presentes en los océanos del mundo (Andrady, 2011). Los países como: China, Tailandia, Indonesia, Vietnam y Filipinas tienen una contribución importante en el vertido de plástico en el mar en comparación con otros países (Mrowiec, 2017). Hay aproximadamente más de 5 billones de piezas de plástico flotando en la superficie del mar. La persistencia de contaminantes plásticos en los cuerpos de agua es una preocupación importante, causa graves peligros para la salud y la evaluación estética del organismo. Es bien sabido que los organismos acuáticos, es decir, el plancton, los peces y, por último, la raza humana, ingieren estos carcinógenos elevados a través de la cadena alimentaria. El consumo de pescado que contiene estas sustancias tóxicas también puede provocar cáncer, diversos trastornos inmunitarios y varias discapacidades congénitas (Horton, *et al*, 2017).

El proceso de degradación de los plásticos en el medio ambiente tarda de 20 a 100 años, llegando incluso a llegar a los 500 años para degradarse por completo (Purwaningrum, *et al*, 2016). Además, la degradación de las bolsas de plástico y los envases de espuma de poliestireno pasan 1000 años (PNUMA, 2018). Causa impactos negativos en el medio ambiente como la disminución de la fertilidad del suelo contaminado con desechos plásticos, la contaminación del agua por componentes plásticos, la interferencia de organismos que descomponen el suelo y la acumulación de compuestos tóxicos a través de las cadenas alimentarias. Además, los desechos plásticos enterrados bloquean las vías fluviales causan inundaciones.

La contaminación plástica en el medio terrestre también constituye una seria amenaza para las plantas y los animales. La cantidad de deliberación plástica en tierra es entre cuatro y veintitrés veces mayor que en el océano. El rango de desechos plásticos mal administrado alcanza hasta el 60% en Asia oriental y el Pacífico y el 1% en América del Norte (Townsend, *et al*, 2019). Los desechos plásticos que llegan al océano cada año se convierten en desechos plásticos para el medio marino y son entre un tercio y la mitad de todos los desechos mal gestionados (Critchell, *et al*, 2019). La liberación de plásticos clorados se vuelve dañina para el suelo circundante, alcanzan el suelo profundo y contaminan las aguas subterráneas u otras fuentes de agua cercanas y también causan graves daños a los organismos que dependen de esta agua (Horton, *et al*, 2017).

Desde los últimos 40 años, los científicos están trabajando para descubrir métodos viables para alterar la destrucción causada por los plásticos en el medio ambiente. Aunque los plásticos tienen una producción mundial de 300 millones de toneladas cada año (Urbanek, *et al*, 2015), solo una fracción se recicla. Varios factores fisicoquímicos y comunidades microbianas en el medio ambiente son eficientes para romper la resistencia de los polímeros (Wilkes & Aristilde, 2017) además de su profunda longevidad. Los fragmentos de polímero se descomponen aún más hasta que se obtienen microplásticos de un tamaño inferior a 5 milímetros. Los microorganismos llevan a cabo una mayor degradación de los microplásticos.

Numerosos estudios han demostrado que el potencial de los microorganismos, incluidas las bacterias y los hongos, capaces de producir exoenzimas y sus productos en condiciones de estrés, degradan eficazmente los polímeros biodegradables (Ahmed, 2018)

La problemática que se plantea es la elevada producción de plásticos en sus diversas formas debido a la alta demanda y acumulación de estos productos en el medio ambiente. Una de las

soluciones propuestas para reducir este impacto ambiental de los residuos plásticos es la degradación ambiental, la cual se refiere a la biodegradación o ataque por aquellos microorganismos del suelo, que tienen la capacidad de degradar estos tipos de contaminantes ambientales.

1.2. Formulación del problema

¿Es posible categorizar y analizar estudios recientes sobre la degradación de plásticos mediada por microorganismos?

1.3. Justificación

El plástico es un material sintético derivado del petróleo casi indispensable en la vida cotidiana, pero la producción desmesurada ha llevado a la acumulación de aproximadamente 1.000 millones de toneladas de plásticos en el planeta causando un impacto ecológico en suelos y océanos (ECOMUNDO, 2011).

El tratamiento de este tipo de polímeros por reciclado presenta desventajas, en el proceso mecánico, se requiere que el material se encuentre libre de sustancias tóxicas o peligrosas, impurezas y contaminación de otros plásticos o materiales. El proceso para reciclar consta de varios pasos, donde el plástico debe ser lavado para eliminar las impurezas, y necesita de una etapa de neutralización del material con una solución acuosa, ácido fosfórico, produciendo residuos en el proceso, los cuales pocas veces tienen tratamiento y terminan en el drenaje (Arciniega, 2008)

La problemática causada por los plásticos es debido a su uso indiscriminado, su resistencia al ambiente y su lenta “degradación”, lo que ha llevado a la investigación para el desarrollo de nuevos materiales y métodos de producción para generar nuevas estrategias que permitan hacer de estos plásticos un polímero menos contaminante y más amigable con el medio ambiente. (Gómez, 2016)

Aislar microorganismos capaces de degradar LDPE, beneficiaría la recuperación de los intermediarios y también ayudaría a la industria de la producción de LDPE porque la poca posibilidad de degradación natural del LDPE, el aumento de la demanda por el consumidor y la gran contaminación por envases botellas

etc., causa que productores busquen otro tipo de plásticos con propiedades similares a este, pero con mayor posibilidad de degradación, logrando que la utilización del plástico disminuya (Plastivida, 2006, citado por Arciniega, 2008)

Con este proyecto se pretende incrementar el estado de arte en estudios de biodegradabilidad de polímeros contaminantes y sus posibles soluciones, basándose principalmente en el papel que llevan a cabo ciertos microorganismos para la reducción de este impacto ambiental. No se han reportado estudios regionales en donde se encuentre o se confirme que existen microorganismos que posean este potencial en biodegradación.

1.4. Objetivo general

Presentar microorganismos con potencial en biodegradación de polímeros contaminantes del medio ambiente, avances obtenidos y futuros desafíos.

1.5. Objetivos específicos

-Describir los mecanismos de biodegradación microbiana, teniendo en cuenta la función enzimática como papel fundamental.

-Exponer las condiciones ideales de crecimiento de los microorganismos frente a la degradación de estos polímeros, analizando factores como el nivel de pH, temperatura y propiedades de los polímeros.

-Establecer las diferencias entre la biodegradación por hongos, la biodegradación por bacterias y la biodegradación por actinomicetos.

-Determinar los avances y desafíos de la biotecnología en el uso de microorganismos con potencial en biodegradación de polímeros contaminantes del medio ambiente.

2. Marco Referencial

2.1. Antecedentes de la investigación

BIODEGRADATION OF POLYMER; Centrefor Biotechnology, Anna University, India; Deparment of Biotechnology, Indian Institute of Technology, Chennai 600 036, India; (Vol 4, abril 2005, pp 186-193)

Se han llevado a cabo estudios exhaustivos sobre la degradación de los plásticos para superar los problemas ambientales asociados con los residuos plásticos sintéticos. Trabajos recientes han incluido estudios sobre la distribución de microorganismos sintéticos degradadores de polímeros en el medio ambiente, el aislamiento de nuevos microorganismos para la biodegradación, el descubrimiento de nuevas enzimas de degradación y la clonación de genes para enzimas sintéticas degradadoras de polímeros. Bajo condiciones ambientales, se sabe que los polímeros experimentan degradación, lo que resulta en el deterioro de las propiedades del polímero, caracterizado por cambios en su peso molecular y otras propiedades físicas. En este trabajo se ha revisado principalmente la biodegradación de polímeros sintéticos tales como poliéteres, poliésteres, policaprolactonas, polilactidas, ácido poliláctico, PU, PVA, nylon, policarbonato, poliimida, poliacrilamida, poliamida, politetrafluoroetileno (PTFE) y el terpolimero acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS). Las especies de *Pseudomonas sp* degradan los poliéteres, poliésteres, PVA, poliimidias y PUR de manera efectiva. No se ha encontrado ningún microorganismo que degrade el PE sin aditivos como como si ocurre en el caso del almidón. Ninguna de las técnicas biodegradables ha alcanzado la madurez suficiente para convertirse en tecnologías.

AISLAMIENTO Y CARACTERIZACION DE MICROMICETOS BIODERADADORES DE POLIETILENO; Carmen R. Méndez, German Vergaray, Vilma R. Béjar y Karina J. Cárdenas; (Julio 2007, Perú)

En el presente trabajo se muestran los resultados del aislamiento y caracterización de cepas de hongos capaces de degradar el PE, así como la determinación de las condiciones de pH y temperatura en las que se logran la mayor actividad. Los hongos fueron aislados de productos elaborados con polietileno obtenidos de relleno sanitario, la identificación taxonómica en base a características macroscópicas del crecimiento en cajas de Petri y el estudio microscópico empleando la técnica de microcultivo en lámina. La actividad biodegradadora se determinó con la técnica de Kavelman y Kendrick, a temperaturas entre 20 y 30 °C y a pH 4,5 – 8,0. Veinte cepas de micromicetos fueron aisladas e identificadas, en 5 (25%) se evidenció la capacidad de biodegradar el PE a 20 °C, siendo el pH 6,5 el óptimo, la cepa de mayor rendimiento pertenece a la especie de *Aspergillus flavus*. A temperatura de 30 °C, 6 (30%) cepas evidenciaron actividad degradadora, siendo pH 6,5 el óptimo, la cepa de mayor rendimiento fue la misma del caso anterior.

AISLAMIENTOS DE MICROORGANISMOS DEGRADADORES DE TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET) EN MEDIO AMBIENTE COMBINADO; Ilse Yazmín Arciniega Carreón; (Mayo 2008, México D.F)

Los microorganismos fueron incubados en medio de cultivos que contenían como sustrato principal el ácido tereftálico y polietilenglicol, estos medios se incubaron a temperatura ambiente y con agitación (120 RPM). El crecimiento de los microorganismos fue observado en el microscopio, cada que se realizaba una resiembra. Los microorganismos que se observaron tenían una morfología de hongos filamentosos y bacterias: bacilos gram (+) y cocos gram (-).

Un interés particular del experimento era determinar si un ambiente desnitrificante puede afectar la degradación de los precursores, por lo que fueron realizados ensayos de cuantificación de nitratos, donde la concentración disminuye conforme pasa el tiempo. Los datos sugieren que los microorganismos que han crecido en los medios son desnitrificantes

Fue utilizada la técnica de HPLC para determinar el porcentaje de degradación de ácido tereftálico, se determinó que los microorganismos degradan el precursor a pH ácido y un tiempo de 20 días. La degradación de polietilenglicol se determinó con DQO. La degradación del polietilenglicol es aproximadamente del 90% en 21 días.

**BIODEGRADACIÓN DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD POR ACCION DE UN
CONSORCIO MICROBIANO AISLADO DE UN RELLENO SANITARIO, Lima, Perú;
Diego Uribe, Daniel Giraldo, Susana Gutiérrez y Fernando Merino; (Abril 2010)**

En el presente trabajo describe el aislamiento y la actividad de biodegradación de microorganismos sobre PEBD. Los microorganismos fueron aislados de materiales plásticos con evidencias de deterioro procedentes de un relleno sanitario de Lima. Las muestras fueron filtradas y preseleccionadas en medio de sales minerales a pH 5,5 y 7,0, para hongos y bacterias respectivamente. 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 aislado fue evidenciada por variaciones en el espectro infrarrojo del PEBD con respecto al polímero sin tratamiento, observándose la reducción del índice de carbonilo (83,89% a pH 7 y 4,08% a pH 5,5) y de terminaciones con dobles enlaces (19,77% a pH 7 y 6,47% a pH 5,5). Finalmente se determinó el porcentaje de peso perdido por el PEBD sometido a las cepas aisladas, observándose una disminución de 5,4% a pH 7 y 4,8% a pH 5.

BIODEGRADACAO DE POLIPROPILENO RECILADO (PPR) E DE POLI (TEREFTALATO DE ETILENO) RECICLADO (PETR) POR *Pleurotus ostreatus*; Paulo Cesar de Faria, Elisabeth Wisbeck y Luciana Pereira Días;(Rio de Janeiro, Brazil;Abril/Junio 2015).

Los hongos del género *Pleurotus*, por tener un solo complejo de enzima, lo que les permite degradan materiales lignocelulósicos, han sido ampliamente estudiados. Estos hongos además de poseer propiedades nutricionales tienen aplicaciones en biorremediaciones tales como la biodegradación de 2,4-diclorofenol, poli (tereftalato de etileno) y poliuretanos. En este estudio, hemos estudiado la biodegradación de polímeros PP y PET reciclado (PrP Petr) por *Pleurotus ostreatus* DSM 1833 en medio de cultivo sólido, usando el medio de cultivo POL, sin glucosa. Los polímeros de PPR y Petr en la forma de *gránulos* y *escamas*, respectivamente, se depositaron sobre placas de Petri que contenían el medio de cultivo. Las placas previamente pasteurizadas se inocularon con micelio de *P. ostreatus* y se incubaron a 30 ° C. La caracterización de los polímeros fue hecha por las pruebas de pérdida de masa (%) y por las curvas de calorimetría diferencial exploratoria (DSC). Después de 45 días de biodegradación el PETr presenta el 3,3% de pérdida de masa mientras que el PPr 0,3%. Como las curvas obtenidas por DSC cristalinidad los polímeros presentaron los siguientes valores: para el PETr biodegradado en 45 días fue del 13%, mientras que el control abiótico fue del 29%. Pero (cPPR fue 31% en el control abióticos 45 días y aumentó a 35% en el ensayo de biodegradabilidad.

BIODEGRADACIÓN DE POLIETILENO DE TEREFTALATO POR MICROORGANISMOS AISLADOS DE SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS, TÁCHIRA, VENEZUELA; Jhonathan Gómez y Cleomary Oliveros (Diciembre 2016)

Se propone determinar el efecto degradador de un grupo de microorganismos, extraídos de sitios de disposición final de residuos sólidos del estado Táchira, para ello se colocaron los aislados en contacto con láminas de polietileno de tereftalato en tubos de ensayo con un caldo MMM y se llevaron a incubación, finalizado este tiempo, se extrajeron las láminas para medir la pérdida de peso de estas. Adicionalmente, se observaron las características físicas de las láminas después de la incubación a través de observación directa y microscópica, arrojando como resultado de este proceso la pérdida de peso efectivas con resultados destacados en las cepas D (43,7 mg), seguida de E (1,1 mg) y luego C (0,8 mg), dos de las cuales (C y D) corresponden a bacterias del tipo bacilos Gram negativos. Adicionalmente fue posible apreciar cambios de opacidad en las láminas del polímero a simple vista y en las observaciones al microscopio se aprecian quiebres y zonas donde se estaría dando el desprendimiento de partes de la estructura, dando lugar a partículas microscópicas del material en suspensión en los tubos contenedores de los caldos de cultivo con las láminas de polietileno. De acuerdo con esto se evidencia que existen diversos microorganismos capaces de degradar PET utilizándolo como única fuente de carbono, siendo esta una alternativa tecnológica para lograr disminuir la gravedad del problema mundial que representa la acumulación de residuos sólidos.

REVISIÓN SOBRE EL ESTADO ACTUAL DE LA DEGRADACIÓN DEL POLÍMERO: UN ENFOQUE MICROBIANO; Vinay Mohan Pathak; (Diciembre 2017)

Los microorganismos son capaces de degradar materiales orgánicos e inorgánicos, y se ha despertado el interés de estudiar los *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas stutzeri*, *Streptomyces badius*, *Streptomyces setonii*, *Rhodococcus ruber*, *Comamonas acidovorans*, *Clostridium thermocellum* microbios por su capacidad para degradar los polímeros plásticos y *Butyrivibrio fibrisolvens* son las *spp* bacterianas dominantes asociadas a la degradación del polímero. *Pseudomonas aeruginosa* es uno de los microorganismos ampliamente reportados para la degradación de polímeros a través de la formación de biopelículas con la ayuda de productos químicos de tipo alginato y sistemas de señalización de detección de quórum, es decir, RhII / RhIR. La formación de biopelículas mejora la eficiencia de degradación seguida por el proceso de mineralización (polietilenglicoles). Las *Pseudomonas aeruginosa* CA9 tienen una mejor biodegradación con LDPE, *Pseudomonas sp.*

Se informa de AKS2 para la formación de biopelículas en LDPE y la biodegradación de LDPE a través del aumento del crecimiento microbiano con un 26% de hidrofobicidad superficial y un 31% de actividad hidrolítica. *Pseudomonas stutzeri* degradaron polietilenglicol de alto peso molecular (4000–20,000) y *Streptomyces badius* 252 y *Streptomyces setonii* 75Vi2 fueron más efectivos contra los plásticos degradables tratados térmicamente. Se ha informado que *Rhodococcus ruber* coloniza y degrada el PE formando una biopelícula y enzimas hidrolizantes. La biodegradación del PE se mejoró al introducir aditivos peroxidantes en los procesos de fabricación que lo hace susceptible a la mineralización in vitro térmica y fotoquímica. *C. acidovorans* TB-35 también es útil para la degradación de poliéster-PU a través de la producción de PUR esterasa y la hidrólisis enzimática.

REVISIÓN BIBLIOGRAFICA SOBRE LOS MICROORGANISMOS BIODEGRADADORES DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD Y SUS EFECTOS EN EL MATERIAL; Nelson Ricardo Acuña Molina;(Bogotá D.C. (01, marzo, 2017).

El presente trabajo es un estudio bibliográfico en el cual se recopilan, comparan y organizan amplia y sistemáticamente los aspectos más relevantes reportados sobre la biodegradación del polietileno de baja densidad (LDPE) en los cuales están incluidos: los microorganismos capaces de utilizarlo como fuente de carbono; las enzimas utilizadas y la comparación de sus eficiencias a partir de la pérdida de masa, considerando las condiciones en las que se realizaron dichas pruebas; todas las técnicas de análisis disponibles, los aditivos o sustitutos existentes; Finalmente se propone una estrategia metodológica de identificación de los microorganismos y cuantificación de la biodegradación que sea adecuada para su implementación local.

ACTINOBACTERIA COMO PROMETEDOR CANDIDATO PARA DEGRADACIÓN BIOPLASTICA DE TIPO ÁCIDO POLILÁCTICO. Natthicha Butbunchu & Wasu Pathom-Aree. (19 de diciembre del 2019)

El ácido poliláctico (PLA) es uno de los bioplásticos más explotados y disponibles comercialmente en todo el mundo. Es un polímero renovable importante para la sustitución de materiales plásticos a base de petróleo. Son tanto plásticos biodegradables como de base biológica. La actividad de degradación microbiana es un método deseable para la seguridad ambiental y el valor económico para la gestión de residuos bioplásticos. Se ha descubierto que los miembros del filo actinobacterias desempeñan un papel importante en la degradación del PLA. La mayoría de las actinobacterias degradantes del PLA pertenecen a la familia *Pseudonocardiaceae*. Otros taxones incluyen miembros de la familia *Micromonosporaceae*, *Streptomyetaceae*, *Streptosporangiaceae*, y *Thermomonosporaceae*. Esta mini revisión tiene como objetivo proporcionar una descripción general de las actinobacterias que degradan el PLA, incluida su diversidad y taxonomía, los procedimientos de aislamiento y detección y la producción de enzimas que degradan el PLA de 1997 a 2019. También se considera dónde realizar el muestreo y cómo podríamos usar estas actinobacterias benéficas para Gestión de residuos PLA.

EFICACIA DE BIODEGRADACIÓN DE NUEVAS ESPECIES INHERENTES AL SUELO. BACILLUS TROPICUS (MK318648) SOBRE MATRIZ DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD. Sucharita Samanta, Deepshikha Datta, Gopinath Halder. (03 de octubre del 2020).

Se estudió la biodegradación del polietileno de baja densidad (LDPE) empleando una cepa microbiana aislada del suelo del vertedero. La cepa bacteriana se identificó como *Bacillus tropicus* (Gen Bank Accession no: MK318648) mediante secuenciación de rRNA 16S. El crecimiento de la cepa se observó en LDPE virgen durante el proceso de biodegradación. El cambio en las propiedades de las películas de LDPE antes y después de la incubación de la cepa bacteriana se observó mediante pruebas FTIR, SEM, AFM, ángulo de contacto, mecánicas y ópticas. Se observó pérdida de propiedades mecánicas y cambios en las propiedades ópticas de la matriz polimérica. Se observó reducción de peso en un 10,15% y caída en el valor de resistencia a tracción, alargamiento a la rotura, resistencia al desgarro, módulo de Young, dureza y rigidez a 8.59 MPa, 10.85 mm, 69.18 N, 272.36, 37.6 Shor D y 10,672.21 N / m respectivamente después de 40 días de incubación. La transparencia y el porcentaje de neblina también se cambiaron a 93,7% y 18,6% respectivamente después del período de estudio. Se midió el pH del medio durante la incubación para evaluar el cambio debido a la formación de diferentes enzimas extracelulares e intracelulares excretadas por la cepa. Por lo tanto, *Bacillus tropicus* podría ser un microorganismo eficiente para degradar películas de LDPE de 10 micrones de espesor, evitando así sus impactos nocivos en el medio ambiente

INVESTIGACIÓN DE CARACTERÍSTICAS EN BIOACTIVIDADES DE FORMACIÓN Y BIODEGRADACIÓN DE PELICULAS DE *Pseudomonas aureginosa* CEPA ISJ14 QUE COLONIZA LA SUPERFICIE DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD. Kartikey Kumar Gupta, Deepa Devi. (2020).

La población y el desarrollo industrial han provocado un gran aumento en el uso de productos plásticos. Dado que el polietileno se degrada lentamente generando compuestos venenosos, la eliminación del plástico del medio ambiente es un requisito previo en la actualidad. La biodegradación de plásticos parece ser un método conveniente y eficaz para frenar este problema. En vista de esto, el presente estudio se centra en la capacidad de degradación de LDPE de la cepa bacteriana *Pseudomonas aureginosa* ISJ14, aislado de vertederos de desechos. Además, la estabilidad del rDNA 16S del aislado se determinó aplicando herramientas bioinformáticas. Para estudios de biodegradación, el polietileno se incubó con el cultivo de *P. aureginosa* ISJ14 en dos medios de crecimiento diferentes, Caldo Buahnell Hssa (BHM) y medio Minimal Salt (MSM) durante 60 días a 37°C a 180rpm. Además, la hidrofobicidad y la viabilidad del aislado bacteriano junto con su cuantificación se realizaron mediante la determinación del contenido de proteína total. Estos resultados indican que *P. aureginosa* ISJ14 puede resultar un candidato adecuado para el tratamiento de residuos de LDPE sin causar ningún daño a la salud humana o al medio ambiente

2.2. Marco Teórico

2.2.1 Biodegradación de Plásticos

La biodegradación es la capacidad del microorganismo para influir degradación abiótica a través de la acción física, química o enzimática. Los microorganismos están involucrados en la degradación y el deterioro de polímeros sintéticos y naturales. La degradación de plásticos es un proceso muy lento; Inicialmente ocurre por factores ambientales, que incluye temperatura, pH y UV. (Rajendran, *et al.*

2015).

La biodegradación generalmente consiste de la hidrólisis catalizada por enzimas y la hidrólisis no enzimática, durante la degradación, las exoenzimas de los microorganismos se descomponen en polímeros complejos que producen cadenas cortas o moléculas más pequeñas, por ejemplo, oligómeros, dímeros y monómeros, que son lo suficientemente pequeños (solubles en agua) para pasar la semipermeabilidad de las membranas bacterianas externas y luego ser utilizadas como fuentes de carbono y energía. (Rajendran, *et al.*, 2015). Este proceso inicial de descomposición del polímero se denomina

despolimerización. La descomposición completa de un polímero produce ácidos orgánicos, dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y agua (H₂O).

2.2.2 Factores que afectan la degradación de plástico

La biodegradación se rige por diferentes factores que incluyen las características del polímero, el tipo de organismo, y la naturaleza de pretratamiento. Las características del polímero, tales como su movilidad, cristalinidad, peso molecular, tipo de grupos funcionales, el sustituyente presente en su estructura, y plastificantes o aditivos añadidos al polímero desempeñan un papel importante en su degradación (Artham & Doble, 2008). La biodegradabilidad de los polímeros se ve afectada por dos factores principales, tales como las condiciones de exposición y las características de los polímeros. Las condiciones de exposición pueden clasificarse como factores bióticos y abióticos. La escisión de la cadena principal por fotodegradación reduce el número de promedios de peso molecular, lo cual proporciona una mayor accesibilidad a la cadena de polímero por humedad y microorganismos (Kijchavengkul & Auras, 2008 citado por Rajendran, *et al*, 2015). Estas moléculas de plástico más pequeñas pueden ser hidrolizadas o utilizadas por los microorganismos más fácilmente. En el caso de poliésteres aromáticos alifáticos, la fotodegradación puede resultar en tanto principal escisión de la cadena y la reticulación

2.2.3 Papel de los microorganismos en la biodegradación

Los microorganismos son ideales para la destrucción de contaminantes porque poseen enzimas que les permiten usar contaminantes ambientales como alimento y porque son tan pequeños que pueden interactuar fácilmente con los contaminantes. Los sistemas de biorremediación en funcionamiento responden sobre microorganismos nativos de los sitios contaminados, alentadores para que trabajen suministrándoles los niveles óptimos de nutrientes y otros productos químicos esenciales para su metabolismo. (Artham & Doble, 2008).

La transformación microbiana de los contaminantes orgánicos normalmente ocurre porque los organismos pueden usar los contaminantes para su propio crecimiento y reproducción.

Los contaminantes orgánicos tienen dos propósitos para los organismos: proporcionan una fuente de carbono, que es uno de los componentes básicos de nuevos constituyentes celulares, y proporcionan electrones, que los organismos pueden extraer para obtener energía (Pathak, 2017); los microorganismos ganan energía catalizando reacciones químicas que la producen, esto implica romper enlaces químicos y transferir electrones lejos del contaminante. (Vivi, *et al*, 2018).

Muchos microorganismos pueden existir sin oxígeno, usando un proceso llamado respiración anaeróbica. En la respiración anaeróbica, el Nitrato (NO_3^-), Sulfato (SO_4^{2-}), metales como el hierro (Fe^{3+}) y manganeso (Mn^{4+}), o incluso el CO_2 , pueden desempeñar el papel de oxígeno, aceptando electrones del contaminante degradado. Por lo tanto, la respiración anaeróbica utiliza productos químicos inorgánicos como aceptores de electrones. Además, de la nueva materia celular, los subproductos de la respiración anaeróbica pueden incluir nitrógeno gaseoso (N_2),

sulfuro de hidrógeno (H_2S), formas de metales y metano (CH_4), dependiendo del aceptor de electrones. (Rajendran, *et al*, 2015)

La degradación oxidativa es el principal mecanismo para la degradación de los plásticos. Estos mecanismos reducen el peso molecular del material y las enzimas extracelulares e intracelulares que son producidas por los microorganismos, los cuales convierten el polímero en monómero, dímero y oligómero. Los subproductos resultantes durante la conversión entran en la célula microbiana y pueden ser utilizados como fuente de energía (Shimao, 2001).

Una bacteria podría sintetizar constantemente todas las enzimas necesarias para la degradación o de lo contrario podría activar la síntesis enzimática según sea necesario para metabolizar cuando las condiciones termodinámicas sean favorables. (Balasubramanian *et al.* 2014) informaron que los factores ambientales (físicos y químicos) juegan un papel importante para iniciar la degradación de los polímeros como polietileno de alta densidad (PEAD).

2.2.4 El papel de las enzimas en la biodegradación

Las enzimas son muy específicas en su acción sobre los sustratos, por lo que las diferentes enzimas ayudan en la degradación de varios tipos de enzimas. Las lacasas pueden ayudar en la oxidación de la columna vertebral de hidrocarburos de PE. Las lacasas están presentes principalmente en hongos biodegradantes de lignina, donde catalizan la oxidación de compuestos aromáticos. Se sabe que las lacasa actúan sobre sustratos no aromáticos (Mayer y Staples, 2002). La lignina y las peroxidasa dependientes de manganeso (LiP y MnP, respectivamente) y las lacasas son las tres enzimas principales del sistema ligninolítico (Hofrichter et al., 2001). Algunas cepas que pueden degradar el PE son *Brevibacillus spp.*, *Bacillus spp.*

Los hongos que degradan la lignina y la peroxidasa de manganeso, parcialmente purificados de la cepa *Phanerochaete chrysosporium* también ayudan en la degradación del PE de alto peso molecular en condiciones limitadas de nitrógeno y carbono (Shimao, 2001). Las enzimas responsables de la degradación de varios tipos de plásticos representan los sustratos que utilizan los plásticos como fuentes de carbono y energía y ayudan en la biodegradación. Las enzimas microbianas inducen la velocidad de biodegradación de los plásticos de manera muy efectiva sin causar ningún daño al medio ambiente. (Basu, et al, 2018).

2.2.5. Efecto del pH en el medio

El valor del pH es un factor clave para la supervivencia y actividad de los microorganismos, generalmente esta entre 6 y 8 de acuerdo a la norma ASTM D 5988. En un estudio se encontró que un género de actinomicetos, las bacterias termófilas *Streptomyces coelicoflavus* NBRC 15299 presentan un amplio rango de tolerancia al cambio del pH que va de 5 a 10. Lo interesante es que durante la actividad biodegradadora disminuye el pH a un valor de 5,6 en 24 días por lo que el microorganismo debe ser altamente tolerante a pH bajos. (Balasubramanian *et al.* 2014). Para la *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Acinetobacter ursingii*, todas bacterias mesófilas cuando se cultivaron en un medio con pH de 7,2 después de 7 días a 30°C, lo acidificaron a 6.41, 6.45, 6.52, las demás cepas sin identificar también acidificaron los medios, en un estudio en el que se usaron las bacterias *Pseudomona putida* S3A se encontró que el pH óptimo estaba en 6,5 en el cual alcanzó el mayor crecimiento en siete días. Los hongos son naturalmente más resistentes a medios ácidos y por lo tanto a pH bajos degradan más rápidamente el LDPE. (Rajendran, et al, 2015).

2.2.6 Efecto de la temperatura

La temperatura óptima para la degradación parece distinta para cada especie microbiana, sin embargo, es común que sean temperaturas relativamente altas, en varios artículos revisados las temperaturas óptimas correspondieron a valores desde los 28 a 55°C. Las bacterias termófilas *Streptomyces coelicoflavus* NBRC 15299 soportan variaciones de temperatura desde los 12° a los 42°C, sin embargo, su temperatura para la degradación óptima fue de 28±2°C. Para las bacterias *Pseudomonas putida* S3A se encontró que la temperatura óptima estaba en 37°C. (Shimao, 2001). En un estudio en el que se usó el hongo *Pycnoporus sanguineus* para degradar PE el

crecimiento se midió por porcentaje de invasión del sustrato, encontrando que, a 22°C, el porcentaje de invasión superó el 90% en un lapso de 21 días, mientras que cuando la temperatura de crecimiento fue de 10°C, el máximo crecimiento llegó apenas a un 32%. En un estudio con tres muestras de hojuelas de PEBD pretratadas con radiación ultravioleta durante 68h, fueron incubadas por separado a 37°C, 46°C y 55°C durante un mes, en presencia de *Bacillus borstelensis*, la temperatura en la que se presentó el mayor grado de biodegradación (14,2%) fue a 55°C. (Rajendran, et al, 2015)

2.3. Marco Conceptual

Biodegradabilidad: Es la capacidad de un material de ser biodegradado, es un proceso natural en el que un material por acción biológica cambia y en general pierde sus propiedades originales y a nivel químico las moléculas que lo conforma se convierten en formas más simples y estables.

Biodegradación Anaerobia (Ausencia de oxígeno): Biodegradación en la que los productos usualmente resultantes son biomasa, biogás (principalmente Metano), agua, metabolitos intermedios y minerales

Biodegradabilidad Aerobia (Presencia de Oxígeno): Biodegradación en la que los productos resultantes de este proceso de degradación son biomasa, CO₂, agua y minerales

Polímeros: Compuesto de alto peso molecular formado por varios compuestos más pequeños de bajo peso molecular, llamados unidades monoméricas

Polietileno: Los polietilenos (PEs) representan el 64% de materiales plásticos producidos como empaques y botellas, los cuales son usualmente desechados después de un uso breve.

LDPE (Polietileno de baja densidad): Es un polímero de la familia de los polímeros olefínicos, como el polipropileno y los polietilenos, y es considerado un polímero termoplástico conformado por unidades repetitivas de etileno.

Residuos reciclables: Son aquellos que no se descomponen fácilmente y pueden volver a ser utilizados en procesos productivos como materia prima.

Consortios Microbianos: Los consorcios microbianos son asociaciones naturales de dos o más especies que actúan como una comunidad, beneficiándose cada uno de ellos de la actividad de los demás. Es decir, se trata de sistemas naturales en los que microorganismos de distintas

especies, a menudo de distintos géneros, coexisten espacialmente y cooperan, posibilitando así la supervivencia de todos ellos.

Enzimas: Son moléculas de proteínas que tienen la capacidad de facilitar y acelerar las reacciones químicas, fundamentales en los procesos del metabolismo celular.

Plásticos Biodegradables: Polímeros fabricados a partir de recursos naturales renovables o de síntesis de hidrocarburos con aditivos o mezclas de ambos, que son biodegradables por la acción de microorganismos en condiciones ambientales determinadas.

Biorremediación: Comprende la aplicación de agentes biológicos, principalmente microorganismos como catalizadores biológicos para degradar, desintoxicar o acumular productos químicos contaminantes.

Fuente de carbono: Se refiere a la fuente del carbono usada por el organismo para su crecimiento y desarrollo. Un organismo se denomina heterótrofo si usa compuestos orgánicos procedente de otros organismos y autótrofo si su fuente del carbono es el dióxido de carbono (CO₂).

Identificación molecular: La amplificación in vitro del ADN se logra en tres pasos básicos, desnaturalización, hibridación y polimerización.

Microbiología: Estudio de organismos que son, con frecuencia, demasiado pequeños para observarlos. Se precisan técnicas especiales para aislarlos y cultivarlos.

Microorganismo: Organismos microscópicos, responsables de muchos de los cambios que se observan en la materia orgánica e inorgánica

3.Hipótesis

Mediante recolección de información científica es posible resumir, categorizar y analizar estudios recientes sobre la degradación de plásticos mediada por microorganismos, discutiendo sus características y mecanismos asociados a la de degradación, pudiendo describir su potencial en biodegradación de polímeros contaminantes del medio ambiente, avances obtenidos y futuros desafíos.

4. Capítulos y Subcapítulos de la Investigación

4.1 Impacto de los plásticos en el ambiente y la sociedad

Actualmente, el mundo se enfrenta a una creciente lucha contra la contaminación por desechos sólidos. Con el pasar de los años, el desenfrenado crecimiento demográfico, el consumismo exagerado de productos, la mala gestión y disposición de residuos sólidos, así como una población que no recicla, ha llevado que cada año se lancen más de 8 millones de toneladas de plásticos a los océanos. (Vertus, *et al*, 2017)

Los países que más generan plástico incluyen a China como el principal productor de residuos plásticos con 23,9%, mientras que Europa se encuentra en el segundo lugar con un 21,5% de la producción mundial de plástico (Plastics Europe, 2015 citado por Khan, *et al*, 2019). Se estima que se utilizan entre 500 mil millones y 1 billón de bolsas de plástico en un año. La mayor parte del plástico utilizado es inerte, lo que genera una gestión de residuos inadecuada y descontrolada, generando que la basura se acumule en el medio ambiente, lo que genera problemas ecológicos y relacionados con la salud.

Según estimaciones, alrededor del 10% de los residuos municipales mundiales son plásticos (Lebreton & Andrady, 2019). No solo el medio ambiente está contaminado, el plástico también representa un peligro para la salud de la vida silvestre. Un problema es la ingestión de plástico por parte de la vida marina que lo confunde con alimento. Según un informe, más de 260 especies, incluidas tortugas, invertebrados, peces, mamíferos y aves marinas, ingirieron o se enredaron en basura. En consecuencia, afectó su movimiento y alimentación, redujo la producción reproductiva, cortes, úlceras y también la muerte. Existe una posible transferencia de plástico y contaminantes a lo largo de la cadena alimentaria que también dañan a los humanos (Santillo et al., 2017).

Por otro lado, el uso incontrolado de plásticos que comenzó hace varias décadas ha causado muchos problemas ambientales relacionados con los usos de eliminación y la contaminación de los residuos plásticos. El proceso de descomposición de los polímeros plásticos lleva miles de años por lo cual, las personas generalmente queman estos desechos para superar la acumulación de desechos plásticos en el medio ambiente, pero la quema de estos plásticos conduce a la contaminación del aire, liberando compuestos tóxicos, CO₂, y dioxinas en el aire liberando gases que causan cáncer y varias enfermedades pulmonares. (Kale, *et al*, 2015, citado por Angga, *et al*, 2021)

4.2 Biodegradación microbiana

La biodegradación es necesaria para los polímeros solubles en agua o inmiscibles en agua porque eventualmente ingresan a corrientes que no se pueden reciclar ni incinerar. (Shah, *et al*, 2008). Es importante considerar la degradación microbiana de polímeros naturales y sintéticos para comprender qué es necesario para la biodegradación y los mecanismos involucrados

Los microorganismos son perfectamente adecuados para la tarea de reducción de contaminantes plásticos porque adquieren enzimas que les permiten utilizar el plástico como sustrato. Los microorganismos pueden catalizar la reacción de oxidación-reducción para romper los enlaces químicos en los polímeros plásticos. (Tokiwa, *et al*, 2009, citado por Jaiswal, *et al*, 2019).

Según estudios anteriormente realizados, el proceso de biodegradación por parte de los microorganismos consta de 4 grandes etapas, las cuales se denominan: Biodeterioración, Biofragmentación, Asimilación y la Mineralización

Biodeterioración

El biodeterioro afecta la degradación superficial de las superficies plásticas que cambian las propiedades físicas, químicas y mecánicas. La formación de biopelículas microbianas fuera y dentro del sustrato plástico está contribuyendo al proceso de deterioro. Provoca una degradación química y física severa, y su formación depende de la estructura y composición de los polímeros plásticos, pero también de las condiciones ambientales (Vivi, *et al*, 2018).

Biofragmentación

La biofragmentación es el siguiente paso de la degradación microbiana después del biodeterioro que incluye la acción catalítica de enzimas microbianas sobre los polímeros plásticos. Las bacterias que tienen potencial para romper los polímeros plásticos generalmente contienen oxigenasas (mono-oxigenasas y di-oxigenasas), agregan moléculas de oxígeno a una larga cadena de carbono y forman productos de alcohol y peróxido que son menos recalcitrantes y dañinos para el medio ambiente (Pathak, 2017). Además, el proceso de transformación de los grupos carboxílicos está catalizado por lipasas y esterasas o por endopeptidasas para el grupo amida. (Jaiswal, *et al*, 2019)

Mineralización y Asimilación

La mineralización y la asimilación son los pasos finales de la degradación microbiana de los polímeros plásticos. Los monómeros plásticos que se forman como resultado de la biofragmentación tienen que atravesar la membrana celular microbiana. Algunos monómeros que no pueden atravesar la membrana permanecen afuera y nunca se asimilan (Kale, et al, 2015). Dentro de las células, las vías catabólicas oxidan los monómeros plásticos y la energía producida se utiliza para formar nueva biomasa celular. El proceso de asimilación incluye la integración de átomos en la célula microbiana para que se complete la degradación. Los metabolitos secundarios formados como resultado de la asimilación pueden transportarse fuera de la célula microbiana y pueden ser utilizados por otros microbios que realizan un proceso de degradación adicional. (Souza, *et al.*2018).

Teniendo en cuenta lo anterior, la biodegradación del plástico por microorganismos puede realizarse mediante cepas puras, comunidades microbianas o consorcios. El uso de cepas puras permite evaluar los efectos de la degradación, así como investigar las vías metabólicas. Las comunidades o consorcios microbianos están compuestos por diferentes géneros y especies que coexisten en un ambiente; así, es posible observar que los microorganismos pueden trabajar juntos para degradar compuestos complejos en monómeros individuales. (Bardají, *et al*, 2020)

Los microorganismos como las bacterias, hongos y algunos actinomicetos están involucrados en la degradación de plásticos tanto naturales como sintéticos.

4.3 Enzimas microbianas como papel fundamental en la biodegradación

La degradación enzimática de los plásticos implica la secreción de enzimas por parte de microbios y luego las enzimas actúan sobre los plásticos y los resuelven de manera eficiente. Las enzimas actúan sobre polímeros de cadena larga y los convierten en monómeros. La región amorfa del plástico es atacada primero por la enzima y luego seguida por la región cristalina. Las exozimas secretadas por microbios convierten los polímeros en monómeros y estos monómeros son absorbidos por las membranas semipermeables de los microbios. (Iram, *et al*, 2019)

La biodegradación del polímero plástico por enzimas microbianas es una tarea típicamente complicada debido a la falta de grupo funcional hidrolizable en su cadena principal C – C. Por lo tanto, inicialmente, el proceso de descomposición de los plásticos implica una acción sinérgica de factores tanto bióticos como abióticos que han sido responsables de la reducción del peso molecular. La exposición a la radiación ultravioleta hace que el grupo carbonilo de los polímeros plásticos sea más vulnerable al ataque enzimático microbiano (Leja & Lewandowicz, 2010, citado por Jaiswal, *et al*.2019).

Muchos informes en la literatura han indicado la aplicación de enzimas microbianas como las enzimas que degradan la lignina (lacasa, peroxidasa dependiente de manganeso), hidroliasa (ureasa, proteasa, lipasa) para la degradación de diversos plásticos. Por ejemplo, en un estudio realizado por Santo, *et al*. 2013. La lacasa termoestable puede degradar el polietileno (PE), después de dos días del período de incubación a 37°C. El tratamiento con cobre también afectó la actividad lacasa durante la degradación de PE y encontró un aumento de 13 veces en el nivel

de ARNm de lacasa detectado usando la cuantificación de ARNm por RT-PCR, en comparación con el control no tratado. El porcentaje de biodegradación también se incrementó (75%) mediante la adición de cobre a *Rhodococcus ruber* C208 que contienen polietileno.

De manera similar, las peroxidasa dependientes de manganeso parcialmente purificadas aisladas de hongos *Phanerochaete chrysosporium* también participaron en la degradación del PE en condiciones limitantes de nitrógeno y carbono afirma Yee, *et al.* 2018 en su estudio. Una enzima de degradación sólida de poliéster-PUR (PUR esterasa) producida por *Comamonas acidovorans* se ha informado que la cepa TB-3 es capaz de degradación del poliuretano (PUR) que tiene un dominio de unión a la superficie de PUR hidrófobo y un dominio catalítico.

Actualmente, solo se han descrito unas pocas bacterias y hongos para la degradación parcial del PET a oligómeros o monómeros. La mayoría de los aislados bacterianos con potencial de degradación del PET son miembros del phylum *Actinobacteria* Gram-positivos (Acero, *et al.* 2011). Los ejemplos mejor caracterizados proceden de los géneros *Thermobifida sp* y *Thermomonospora sp* (Kawai, *et al.* 2014). Las enzimas implicadas en la degradación (por ejemplo, PET hidrolasa y tanasa, MHETasa) son serina hidrolasas típicas, por ejemplo, cutinasas lipasas y carboxilesterasas. Estas enzimas poseen un pliegue típico de α / β -hidrolasa, y la tríada catalítica está compuesta por un residuo de serina, histidina y aspartato (Wei, *et al.* 2014). También pueden contener varios enlaces disulfuro causados por residuos de cisteína, que promueven la estabilidad térmica y la unión específica al PET, como lo muestra el ejemplo de PETasa de *Ideonella sakaiensis* (Yoshida, *et al.* 2016). Además de la PET hidrolasa, el genoma de *Ideonella sakaiensis* codifica una segunda enzima que parece ser única hasta ahora y que comparte una gran similitud con el grupo de las tannasas, capaz de degradar el ácido mono (2-hidroxi)etil tereftálico. La PET hidrolasa como enzima secretada produce el ácido mono (2-

hidroxietil) tereftálico intermedio (MHET). MHET es internalizado por la célula e hidrolizado por MHETase. (Danso, *et al*, 2019)

Los poliuretanos (PUR) se pueden sintetizar utilizando diferentes polioles de poliéter o poliéster. La biodegradación se logró mediante bacterias u hongos. Según estudios de Bollinger, *et al*, 2018 una de las primeras enzimas identificadas para actuar sobre PUR fue la lipasa PueB de *Pseudomonas chlororaphis*. Este organismo codifica al menos una enzima adicional activa en PUR, que se denominó PueA (Hajighasemi, *et al*, 2018). Ambas enzimas son lipasas; El PUR es degradado por las hidrolasas secretadas y la degradación está estrictamente regulada. Otro ejemplo más proviene de *Comamonas acidovorans* TB-35. Esta cepa produce una enzima activa con PUR que es una esterasa y que se denominó PudaA (Howard, *et al*, 2001 citado por Danso, *et al*, 2019). PudaA muestra un dominio de unión a la superficie de PUR hidrófobo y un dominio catalítico distinto, y su dominio de unión a la superficie se considera esencial para la degradación de PUR. PudaA actúa como un monómero de 62 kDa y libera dietilenglicol y ácido adípico a una temperatura óptima de 45 ° C y un pH óptimo de 6,5.

Las esterases, lipasas y cutinasas son hidrolasas que son fundamentales en la degradación del plástico (Ruiz, *et al*, 1999; Sangale *et al*. 2012; Novotny *et al*. 2015; Mohan *et al*. 2016). Las hidrolasas son importantes para la escisión enzimática de polímeros en la que los enlaces éster se rompen a través de un ataque nucleofílico en los átomos de carbono del carbonilo creados por reacciones de oxidación previas (Devi, *et al*, 2016). En un estudio de Tribedi *et al*. 2013 afirma que la degradación del succinato de polietileno (PES) por *Pseudomonas sp.* en un suelo bioaumentado fue facilitado por la actividad hidrolasa y deshidrogenasa determinada por ensayos enzimáticos. Las esterases pueden hidrolizar ésteres, ya estén presentes en el polímero o producidos a través de reacciones de oxidación, en alcoholes, fenoles y ácidos. Por ejemplo, una

esterasa de *Pseudomonas sp.* fue capaz de romper los enlaces éster en el succinato de polietileno (PES) para generar ácido succínico, un metabolito del ciclo del ácido tricarboxílico (TCA). Se cree que las enzimas que degradan el poliuretano son principalmente esterases o proteasas extracelulares que están unidas a la membrana o secretadas extracelularmente (Mukherjee, *et al*, 2011; Cregut, *et al*, 2013; Shah, *et al*, 2013). El término poliuretanasa se usa a menudo para describir las enzimas responsables de la degradación de PU (Howard, *et al*, 2000 citado por Wilkes, *et al*, 2017). Sin embargo, este término se utiliza sin una confirmación definitiva de la hidrólisis del enlace carbamato. Por lo tanto, se recomienda que la poliuretanasa se informe como hidrolasas o esterases (Biffinger *et al*, 2014). Hasta este punto, se demostró que una enzima extracelular de *P. chlororaphis* con actividades de esterasa y proteasa degrada con éxito el poliéster PU (Ruiz, *et al*. 1999 citado por Wilkes, *et al*, 2017). Esta enzima también se clasificó como serina hidrolasa porque podría ser inhibida por el fluoruro de fenilmetano sulfonilo (Ruiz, *et al*, 1999 citado por Wilkes, *et al*, 2017).

El poliuretano fue degradado significativamente por *Pseudomonas sp.* lipasa, pero solo parcialmente degradada por una esterasa recombinante de *P. fluorescens* (Biffinger, *et al*, 2015). Se informó en un estudio de Novotny, *et al*, 2015 que la producción de grandes cantidades de esterases y lipasas extracelulares en *P. aeruginosa* facilita la degradación de poliésteres y poliesteramidas aromático-alifáticos. Una cutinasa extracelular de *P. mendocina* que actúa sobre una película de PET con un 7% de cristalinidad provocó una pérdida de peso de la película del 5% después de 96 horas y produjo ácido tereftálico (TPA) y etilenglicol (EG) como únicos productos (Ronkvist, *et al*, 2009 citado por Wilkes, *et al*, 2017). La investigación anterior se ha centrado en las enzimas extracelulares e intracelulares que participan principalmente en los primeros pasos de la degradación del plástico.

4.4 Factores que afectan la biodegradación microbiana

Los microorganismos heterótrofos pueden colonizar eficazmente los plásticos como sustrato.

Además, diferentes factores como las propiedades de los polímeros, la naturaleza de los organismos y los métodos de pretratamiento generalmente actúan sobre la biodegradación de los polímeros. (Iram, *et al*, 2019).

Las propiedades de los polímeros como la ductilidad y friabilidad, el peso molecular (el peso molecular juega un papel clave en la definición de las propiedades de un polímero. El aumento del peso molecular disminuye la velocidad de degradación. Los poliésteres de bajo peso molecular son fácilmente degradables por las enzimas), la temperatura de fusión, la temperatura de transición vítrea, el módulo de elasticidad, la naturaleza de los grupos funcionales y los sustituyentes unidos, el tipo de aditivos agregados, morfología (los polímeros que tienen una gran superficie específica son fáciles de degradar por una enzima. Para la biodegradación, existe un criterio estándar de forma y tamaño para diferentes tipos de polímeros), flexibilidad y la reticulación afectan la biodegradación polimérica. (Varjani & Upasani, 2017).

Por otro lado, se tienen en cuenta también las condiciones de exposición al medio ambiente como pH (La velocidad de la reacción hidrolítica se ve afectada por el cambio de pH. La degradación de varios polímeros da como resultado un producto que cambia el pH. El cambio de pH altera la tasa de crecimiento microbiano y, por lo tanto, afecta la tasa de degradación) (Iram, *et al*, 2019), temperatura, humedad (es necesario un contenido de agua suficiente para la activación de microbios. La actividad hidrolítica de los microbios aumenta con un mayor contenido de humedad.), UV radiaciones, biotensioactivos, hidrofobicidad y las enzimas determinantes de la actividad microbiana.

4.5. Hongos, Bacterias o Actinomicetos ¿Cual posee mayor capacidad de biodegradación?

Bacterias

Las bacterias son el motor de los nutrientes de la tierra, ya que están en primera línea para la transformación y el ciclo de los nutrientes en el medio ambiente. Al igual que otros microorganismos, su papel en la descomposición garantiza la liberación de carbono y nutrientes de diferentes polímeros complejos, tanto de origen natural como sintético. Se ha demostrado que diferentes especies bacterianas de los géneros *Pseudomonas*, *Escherichia* y *Bacillus* tienen un potencial significativo para degradar polímeros plásticos. Curiosamente, estas bacterias degradadoras de plástico también se han aislado en diferentes nichos ecológicos, como los vertederos (Muhonja et al., 2018), los lugares de reciclaje (Yoshida et al., 2016), los vertederos (Gaytán et al., 2020) y el entorno marino (Urbanek et al., 2018). Los estudios han demostrado que la capacidad de las bacterias para degradar el plástico se basa en su capacidad natural para degradar los ácidos grasos de cadena larga, por lo que no es de extrañar que *Pseudomonas* sea el género bacteriano más destacado y estudiado en lo que respecta a la degradación de polímeros plásticos (Wilkes y Aristilde, 2017). Se ha observado que la formación de biopelículas desempeña un papel importante en la descomposición bacteriana de los plásticos, ya que favorece la adherencia de las colonias a la superficie del plástico, así como su persistencia (Puglisi et al., 2019). Como resultado de la naturaleza homopolimérica de los termoplásticos, se sabe que son más resistentes a la biodegradación microbiana, sin embargo, uno de los hallazgos más significativos sobre la degradación del plástico es la capacidad de *I. sakaiensis*, una *sakaiensis*, una nueva especie aislada de un consorcio de bacterias de vertedero, para degradar el

PET, ya que utilizó el polímero como su principal fuente de energía y carbono (Yoshida et al., 2016). El poliestireno y el policarbonato son otros termoplásticos comunes que han demostrado ser degradados por *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus megaterium*, *Rhodococcus ruber*, *Serratia marcescens*, *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus pyogenes* y otras cepas bacterianas (Arefian et al., 2020; Ho et al., 2018). Del mismo modo, las bacterias de diferentes clases, incluyendo *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Micrococcus* también han demostrado degradar varios plásticos termoestables, principalmente el poliuretano (Amobonye et al., 2020). Aunque la mayoría de los estudios destacaron la biodegradabilidad de las cepas bacterianas puras, sin embargo, en la naturaleza, las bacterias suelen actuar de forma sinérgica en consorcios que también se han demostrado en diferentes estudios (Lwanga et al., 2018; Shah et al., 2008). Como se ha dicho anteriormente, la tasa de biodegradación microbiana puede verse afectada negativa o positivamente por una serie de factores externos, algunos de estos factores han sido objeto de investigaciones para acelerar la degradación bacteriana de diferentes polímeros plásticos in vitro. La adición de aditivos específicos, como las nanopartículas sensibilizadas con colorantes de grado alimentario y el almidón, reveló una mejora en la tasa de degradación del PE por parte de algunas bacterias como *Pseudomonas aeruginosa*, *Burkholderia seminalis* y *Stenotrophomonas pavanii* (Mehmood et al., 2016).

Las bacterias son un grupo importante de microorganismos y son los más abundantes de todos los organismos; las bacterias viven principalmente en el suelo, el agua y la atmósfera, y muchas especies son bien conocidas por su capacidad para degradar los contaminantes (Bakir et al., 2014). Las *Pseudomonas* han sido identificadas como el género con mayor eficiencia de degradación. Esto se puede deber a que es uno de los géneros más proclives a la degradación de compuestos orgánicos, especialmente las cepas de la especie *Pseudomonas putida*. Este género

es capaz de procesar, integrar y reaccionar a una amplia de variedad de condiciones cambiantes en el medio ambiente y muestra una alta capacidad de reacción a señales físico-químicas y biológicas. Esto les ha permite utilizar una amplia gama de fuentes de carbono como nutrientes, así como colonizar ambientes y nichos que difícilmente son colonizables por otros microorganismos. Otra de las ventajas de este género, es que son capaces de crecer en medios simples. Las condiciones ideales que se han demostrado que son más viables para el crecimiento de las *Pseudomonas putida* es en temperaturas de 22°C a 37°C, pH 6.4 (Tasic et al.,2014).

Hongos

Los hongos, junto con las bacterias, desempeñan los papeles más dominantes entre todos los microbios en el mantenimiento de los ciclos biogeoquímicos y los nutrientes esenciales en la Tierra. El potencial de diferentes especies de hongos para degradar diversos polímeros plásticos se ha puesto de manifiesto en función de su capacidad para utilizar estos polímeros sintéticos como su principal o única fuente de carbono o energía. En este sentido, se ha demostrado que una amplia variedad de cepas fúngicas que abarcan diferentes clases, ecología y formas degradan los plásticos. Los estudios más recientes han demostrado que el género *Aspergillus* es el grupo fúngico más destacado en cuanto a la biodegradación de plásticos sintéticos. *A. clavatus* (Gajendiran et al., 2016), *A. fumigatus* (Osman et al., 2018), y *A. niger* (Usman et al., 2020) son algunas especies de *Aspergillus* aisladas de diferentes hábitats terrestres y han demostrado degradar el polietileno (PE), poliuretano (PU) y polipropileno (PP) respectivamente. Otras especies de hongos con una importante degradabilidad de plásticos son *Fusarium solani*, *Alternaria solani*, *Spicaria spp.*, *Geomyces pannorum*, *Phoma sp.*, *Penicillium spp.* (Muhonja et al., 2018; Zhang et al., 2020).

Actinomicetos

Los actinomicetos constituyen un grupo diverso de bacterias filamentosas presentes en el suelo, los tejidos vegetales y los entornos marinos, que han destacado por su versatilidad metabólica y sus numerosas aplicaciones biotecnológicas, como en la biorremediación, la medicina y la industria alimentaria. Los actinomicetos, incluidos los grupos *Streptomyces*, *Rhodococcus ruber*, *Actinomadura spp.* y las especies termófilas *Thermoactinomyces*, se han aislado de diferentes zonas ecológicas y han demostrado poseer un importante potencial de biodegradación de plásticos (Auta et al., 2018; Jabloun et al., 2020). Su propensión a producir una amplia variedad de diferentes enzimas hidrolíticas, así como otros metabolitos bioactivos, ha sido destacada previamente (Gohain et al., 2020). Estas enzimas hidrolíticas son uno de los principales factores responsables de su capacidad para crecer en diferentes polímeros plásticos y degradar los compuestos de alto peso molecular a otros más simples. Al igual que las bacterias, la formación de biopelículas también ha demostrado ser un factor importante en la colonización actinomicetal de los plásticos (Gilan y Sivan, 2013).

Teniendo en cuenta a las investigaciones consultadas entorno a la biodegradación microbiana y su efectividad con respecto a la disposición de plásticos, se evidenciaron los diferentes niveles de degradación de cada uno de los grupos microbianos mencionados anteriormente. De esta forma se logró destacar las bacterias como el grupo microbiano con mayor potencial en biodegradación debido a que es un grupo que se adapta muy fácilmente a las condiciones ambientales y propiedades de los polímeros, acelerando su proceso de descomposición en el ambiente.

No obstante, se lograron encontrar estudios que demuestran que los Hongos, además de las bacterias, son un grupo predominante y con alta capacidad de biodegradación, de los cuales se resaltó el género *Aspergillus sp* como género principal y eficiente en el proceso de degradación.

A diferencia de los dos grandes grupos microbianos mencionados anteriormente, las investigaciones referentes al uso de Actinomicetos en procesos biodegradativos son pocas, debido a que este grupo se desenvuelve mejor en el área agrícola como promotor de crecimiento vegetal y controlador biológico.

4.6. Avances de la Biotecnología para hacer frente a la contaminación

Actualmente, la biotecnología se ha presentado muy prometedora, principalmente en lo que respecta a la mitigación de la contaminación plástica, proporcionando principalmente dos estrategias de base biológica: producción de plásticos biodegradables y uso de organismos capaces de degradar los plásticos.

La segunda es la mejor estrategia para mitigar la contaminación por micro (nano) plásticos, la cual consiste en el uso de organismos capaces de convertir los polímeros complejos en moléculas simples como el dióxido de carbono y el agua. Aunque a velocidades bajas, este proceso puede ocurrir de forma natural y, por lo tanto, se ha encontrado que numerosos organismos pueden degradar polímeros sintéticos, desde gusanos a los microorganismos. (Bombelli, *et al*, 2017)

Mediante la Biotecnología Ambiental se han diseñado estrategias para controlar la contaminación plástica en las aguas urbanas, estas estrategias se basan en el tratamiento de aguas residuales. En estos sistemas, los desechos plásticos grandes se eliminan mediante un cribado y luego se depositan en vertederos; los microplásticos se eliminan principalmente mediante la unión a biosólidos que luego se transfieren a las instalaciones de manipulación de sólidos (Mahon, *et al*, 2017), una pequeña fracción de este permanece en el efluente tratado (Sutton, *et al*, 2016).

Actualmente los investigadores han aislado microorganismos que degradan el plástico de vertederos y sitios de producción de petróleo (Gravouil, *et al*, 2017), pero hasta la fecha, las tasas alcanzadas por cultivos puros aislados han sido bajas y casi todos los aislamientos están restringidos al crecimiento de un solo tipo de plástico (Wierckx, *et al*, 2018).

En esta misma rama, también se tienen en cuenta la creación de sistemas para la producción y reciclaje de plásticos. Se han creado estrategias para asegurar la eliminación de los materiales reciclados y desarrollar reemplazos de química verde. (Blum, *et al*, 2017). Dentro del marco de

Ecociclables, los aditivos químicos dentro de nuevos materiales se evaluarían mediante pruebas toxicológicas y de bioacumulación.

Por otro lado, investigaciones recientes han demostrado que, mediante el uso de conocimientos y estrategias proporcionadas por el área de Biotecnología Agrícola, se ha podido identificar un entorno en el que los plásticos estructuralmente diversos, experimentan una rápida degradación: El intestino de los artrópodos, específicamente las larvas de insectos de *Tenebrio molitor* (gusanos de harina) (Yang, *et al*, 2018), *Plodia interpunctella* (polilla de la harina de la India) (Yang, *et al*, 2014) y *Galleria mellonella* (polillas de cera) (Kong, *et al*, 2019).

Los más estudiados son los gusanos de harina, con vidas medias para la conversión del plástico ingerido en CO₂ del orden de 15 a 20 horas, mucho más rápido que las tasas observadas para los aislados microbianos (Yang, *et al*, 2015). Según en su estudio, únicamente en bloques de poliestireno durante 16 días fueron capaces de convertir hasta el 47,7% del carbono ingerido en dióxido de carbono, mientras que el carbono restante se expulsó en forma de heces. Además, en un estudio reciente, los hongos *Aspergillus niger* y las bacterias *Streptomyces sp.* degradaron respectivamente 26,17% y 46,7% en peso de polvo de polietileno de baja densidad (53-75 µm) después de 6 meses (Deepika & Jaya, 2015).

En el intestino del gusano de la harina, el microbioma también puede degradar múltiples tipos de plásticos y mezclas (por ejemplo, Polietileno y Poliestireno) sugiriendo un ataque oxidativo no específico inicial. (Brandon, *et al*, 2018)

Dado que los productos de la degradación del gusano de harina contienen grupos funcionales oxidados, es posible que dichos metabolitos sirvan como sustratos para la producción futura de Polihidroxialcanoatos (PHA), convirtiendo un plástico que de otro modo sería recalcitrante en uno que sea biodegradable y sostenible. (Narancic & O'connor, 2017). Esta posibilidad se ha

demostrado para el Tereftalato de Polietileno (PET): la hidrólisis de PET mediada enzimáticamente produce ácido tereftálico y etilenglicol (Wei & Zimmermann, 2017), los cuales pueden servir como materia prima para PHA. (Frandsen, *et al*, 2018).

El gran desarrollo científico y tecnológico, ha permitido aplicar principios científicos y de ingeniería a la transformación de materiales por acción de agentes biológicos. Como se pudo mencionar anteriormente la biotecnología juega un papel importante en este tema ya que mediante la Biorremediación se han logrado avances en cuanto al tema de degradación microbiana. Como 1er avance se da el desarrollo de estrategias ambientales dictadas por la rama de la Biotecnología Ambiental que se ha fundamentado principalmente en la capacidad degradadora de los compuestos contaminantes por parte de la actividad metabólica de los microorganismos presentes en el ecosistema. Teniendo en cuenta que la contaminación plástica se ha convertido en un problema global y una amenaza para la salud humana y ambiente, se han destacado estudios y avances que implementan las herramientas biotecnológicas, como por ejemplo, se ha descubierto un tipo de bacteria que produce una enzima capaz de descomponer las botellas de plástico, tal y como sugiere un nuevo trabajo publicado en Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS). Los orígenes del nuevo descubrimiento surgió en 2016, cuando un grupo de científicos japoneses, bajo el liderazgo de Shosuke Yoshida, identificó una nueva especie de bacteria llamada *Ideonella sakaiensis*, capaz de usar el tereftalato de polietileno como fuente de carbono y energía; en otras palabras, capaz de alimentarse de PET. Este ha sido hasta el momento uno de los más grandes avances que se ha dado con respecto a este tema, este estudio no se ha podido aplicar a campo debido a que aun se tiene dudas y no se sabe que tan bien funcionará dicha bacteria en condiciones ambientales, pero

por el momento se trata hasta ahora del único microorganismo conocido con tal capacidad. Con esta nueva enzima se podría degradar PET en pocos días, en comparación con los 450 años que tarda en degradarse naturalmente. Según Brandon, *et al*, 2018 se ha descubierto que las orugas del gusano de cera rompen el plástico en cuestión de horas, y los gusanos de la harina poseen microbios intestinales que comen a través del poliestireno; también afirma que el uso de microorganismos no es la única solución biológica y factible que existe, sino que también el uso de insectos en este caso orugas y gusanos ha demostrado ser eficiente al momento de realizar los estudios de degradación. Innovar como menciona los autores es la manera por la cual se puede descubrir diferentes formas de combatir esta contaminación. Se ha demostrado también que el uso de microorganismos y gusanos al mismo tiempo acelera el proceso de degradación debido a que existe una simbiosis en el intestino del gusano por el cual los microorganismos son capaces de secretar las enzimas necesarias y llevar a cabo dicho proceso.

Cabe mencionar que para llevar a cabo la biodegradación los microorganismos producen y secretan al medio enzimas, siendo éstas las moléculas que realmente causan la ruptura de la cadena polimérica en fragmentos de bajo peso molecular, oligómeros o monómeros. Es por ello que otra alternativa para degradar los polímeros es el empleo directamente de estas enzimas específicas.

Los monómeros obtenidos como productos de la reacción de la degradación se pueden recuperar y ser empleados en la síntesis de nuevos productos, lo que implica un método de reciclado químico sostenible, el cual se han evaluado la actividad de lipasas, proteasas y esterases individualmente y también se han analizado posibles sinergias que pueden ocurrir entre las diferentes enzimas, obteniendo resultados positivos para la actividad conjunta de lipasas y proteasas y esterases.

Dentro de los nuevos avances e investigaciones se encuentran la modificación genética de microorganismos con capacidad de degradar plástico y con la ayuda de la tecnología se espera

que las herramientas genéticas ayuden a aumentar la síntesis de enzimas de interés y mejorar las alternativas para la eliminación de los desechos que históricamente se han acumulado en los suelos y cursos de aguas. Estas estrategias biotecnológicas pueden constituir una ventaja para el tratamiento y mitigación de los plásticos frente a la contaminación de la misma.

4.7. ¿Puede la Biotecnología cambiar el rumbo del plástico?

Las estrategias biotecnológicas pueden constituir una ventaja para el tratamiento y mitigación de los micro (nano) plásticos frente a los macro-plásticos, ya que su gran relación superficie / volumen es más coherente con el uso de microorganismos. En el medio ambiente, las herramientas biotecnológicas tendrían que acoplarse con el microbiota específico de los plásticos para el espacio y el acceso al “recurso alimentario”. (Silva *et al*, 2018)

Las herramientas biotecnológicas desarrolladas para entornos marinos pueden tener el potencial de ser transferidas a otros entornos que necesitan remediación, como suelos muy contaminados, por lo que esto puede ser interesante para futuras investigaciones. En definitiva, la biotecnología puede contribuir al desarrollo de políticas de economía circular, ya que los plásticos biodegradables (de base biológica) son una posible alternativa sostenible. (Lambert & Wagner, 2017) Aun así, es necesario considerar debidamente su desempeño en entornos ambientales, ya que es posible que no se logren las condiciones para su biodegradación eficiente, y se debe aclarar el destino y el impacto de los productos de degradación.

Actualmente, el mayor desafío que ocupa este tipo de investigaciones, son las diferentes alteraciones en la abundancia, composición y actividad metabólica de las comunidades microbianas, lo que significa que cada vez que ocurra un cambio ambiental o cambio en el suelo, dichos microorganismos sufren un cambio en su metabolismo lo que les obliga a adaptarse al

ambiente que los rodea, lo que genera en ocasiones muerte de algunos microorganismos y en casos favorables microorganismos con mayores capacidades metabólicas. Para este tipo de desafíos se han propuesto metodologías ligadas a la ingeniería genética, las cuales están basadas en diferentes modificaciones genéticas de estos microorganismos para hacerlos más resistentes a los cambios y alteraciones que presenta el ambiente y suelo actualmente, modificaciones a partir de la extracción de genes y enzimas propias de estos microorganismos para estudiarlos y poderlos insertar en otros microorganismos para mejorar su metabolismo y en este caso mejorar la capacidad de biodegradación de esta clase de polímeros, estudios como el de los investigadores Amobonye, *et al*, 2020 proponen una modificación en el ADN de microorganismos con esta capacidad biodegradativa mediante el uso de enzimas como ligasas y proteasas las cuales al momento de extraerlas, les son insertados genes para la aceleración de su capacidad metabólica, también afirman que estas extracciones se realizan mejor en bacterias ya que se es más fácil romper la membrana celular de estas.

Otros estudios como el de (Gohain et al., 2020) discuten la posibilidad de hacer compatible estos microorganismos entre ellos con el fin de formar consorcios microbianos, que contengan diferentes comunidades y grupos microbianos, ya que se ha demostrado que en grupos se obtiene una mejor degradación; pero no solo compatibilidad entre los mismos microorganismos, sino también con los factores bióticos y abióticos del ambiente para que exista una mayor simbiosis y una mayor capacidad metabólica.

Por otro lado, también se tiene como desafío el uso indiscriminado de plásticos, lo que ocasiona una mayor contaminación, visto esto, las grandes empresas ambientales han ido formulando alternativas para tratar de disminuir la contaminación ya que creer que existe una forma de no generar plástico es imposible, para desafíos como estos es necesario realizar propuestas

ambientales o modificaciones en dichas políticas que ya se tienen, las cuales lleven a la sociedad al mínimo uso de estos plásticos. Actualmente se ha visto propuestas como el de las botellas de agua con un menor porcentaje de plástico las cuales ayudaran lentamente a una mejora a esta problemática, dichas propuestas pueden ir dirigidas principalmente al sector industrial ya que es el más propenso a generar plástico. (Lambert & Wagner, 2017) afirman que una propuesta factible para dicha problemática es la creación de plásticos biodegradables o de base biológica, pero que hay que realizar estudios exhaustivos para demostrar dicho proceso de biodegradación en el ambiente, en pocas palabras se deben tener en cuenta las propiedades físicas y químicas del plástico creado para que este se pueda adaptar a las condiciones del ambiente y que cuando entre en contacto con los factores bióticos y abióticos ya mencionados, su proceso de degradación sea efectivo.

Hasta la fecha, ningún estudio mencionado se ha aplicado ya que aún no se ha demostrado su total efectividad en el ambiente y no se han solucionado o aclarado inconvenientes vistos en el laboratorio, lo que nos lleva a otro desafío actual, el cual se refiere a que la biodegradación de polímeros sintéticos no se ha aplicado a escala comercial debido a su lenta tasa de degradación; sin embargo, todavía se están realizando investigaciones sustanciales en el campo de biodegradación.

Añadido a lo anterior también se tiene el desconocimiento de este tipo de procesos biológicos que pueden llegar a ser muy útiles y llegar a reemplazar procesos químicos que por lo general empeoran y generan más contaminación de la que ya existe. La biotecnología a través de sus años ha innovado y creado estrategias que reemplazarían el uso químico por uso biológico, y mediante ella brindar esta información a la sociedad para que tomen dicho conocimiento y lo puedan poner en práctica, ya que es sano con el ambiente y genera beneficios a este.

Finalmente, hay una última cuestión asociada al uso de la biotecnología para hacer frente a la remediación de micro (nano) plásticos que aún no se ha abordado adecuadamente: la eliminación de la biomasa resultante del tratamiento biológico. Dependiendo de los organismos utilizados para la biorremediación, la biomasa podría aplicarse como fertilizante, reutilizarse para otros procesos de biorremediación o incluso utilizarse para producir productos de valor agregado. (Silva *et al*, 2018).

5. Conclusiones

La biodegradación plástica involucra algunas enzimas tales como: hidrolasa y oxidasa producidas por muchos microorganismos, incluidas las bacterias. Este proceso enzimático descompone los polímeros plásticos recalcitrantes en biomasa microbiana y otros compuestos ambientalmente seguros a lo largo de varios pasos, incluido el biodeterioro, la biofragmentación, la asimilación y la mineralización.

Con respecto a la capacidad de degradación de los diferentes grupos microbianos, las bacterias se mostraron muy efectivas para dicha actividad, ya que en la búsqueda de la información este grupo predominó con respecto al grupo de los Hongos y de los Actinomicetos, haciendo que este grupo sea el más recomendado para llevar a cabo procesos de biodegradación.

La contaminación por plásticos ha sido un motivo de preocupación social desde hace mucho tiempo con respecto al campo de las Ingenierías verdes, la ecología y las ciencias de los materiales. Sin embargo, los estudios sobre el comportamiento de la biodegradación de plásticos pueden contribuir a un mejor entendimiento de las formas de promover la reducción de estos en el medio ambiente.

La aplicación de estos microorganismos para la biorremediación de plásticos en el ambiente todavía exige una amplia investigación y posibles cambios para permitir la aplicación de organismos modificados genéticamente para el mayor bien del medio ambiente libre de contaminación. Este trabajo de investigación resume la literatura reciente sobre la degradación de los plásticos mediada por microorganismos y su comportamiento frente a la degradación, junto con las características y los mecanismos enzimáticos de estos respecto a los plásticos.

6. Recomendaciones

Los plásticos son un problema ambiental y global y, por lo tanto, se han establecido varias acciones mediadas por programas para su mitigación. Sin embargo, existe la necesidad de implementar y hacer cumplir la legislación existente, así como de mejorar las medidas de control de fuentes, residuos, gestión y limpieza. Además de lo anterior, se deben priorizar estrategias basadas en el reciclaje y el consumo/demanda de plásticos.

Por otra parte, se recomienda investigar sobre el uso de los insectos, específicamente, las larvas de los insectos mencionados en el desarrollo de la monografía, ya que mostraron ser también efectivos al momento de llevar a cabo el proceso de degradación, siendo otra alternativa útil y ecológica con el ambiente.

Profundizar más a fondo sobre el uso de Actinomicetos en procesos de biodegradación, ya que fue escasa la información encontrada acerca de este grupo microbiano, además de esto, también tratar o realizar los mismos estudios pero con consorcios microbianos ya que la unión de varios microorganismos con sus respectivas enzimas puede ser factible y mejor que usar cada microorganismos solo y por último usar esta revisión como una ayuda conceptual, que busca principalmente el aumento de estudios relacionados o enfocados a este tema.

Referencias Bibliográficas

- Acuña, N. (2017). Revisión bibliográfica sobre los microorganismos biodegradadores de Polietileno de Baja Densidad y sus efectos en el material. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C. Recuperado de:
<http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/5608/1/Acu%C3%B1aMolinaNelsonRicardo2017.pdf>.
- Acero EH, Ribitsch D, Steinkellner G, Gruber K, Greimel K, Eiteljoerg I, Trotscha E, Wei R, Zimmermann W, Zinn M, Cavaco-Paulo A, Freddi G, Schwab H, Guebitz G. (2011). Enzymatic surface hydrolysis of PET: effect of structural diversity on kinetic properties of cutinases from *Thermobifida*. *Macromolecules* 44:4632–4640. doi:10.1021/ma200949p.
- Ahmed, T., Shahid, M., Azeem, F., Raaul, I., Shah, AA, Noman, M., Muhammad, S. (2018). Biodegradación de plásticos: Escenario actual y futuras perspectivas de seguridad ambiental. *Reinar. Sci. Pollut. Rea.* 1-12.
- Amobonye, A., Bhagwat, P., Singh, S., & Pillai, S. (2020). Plastic biodegradation: frontline microbes and their enzymes. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143536
- Andrady, A. (2011). Microplásticos en el medio marino. *Mar. Pollut. Toro.* 62 (8); 1596-1605.

- Angga, A., Agus, W & Septi, W. (2021). A Review: Plastic Waste Biodegradation Using Plastic Degrading Bacteria. *Journal of Enviromental Treatment Techniques*. 9(1): 148-157
- Arciniega, I. (2008). Aislamientos de microorganismos degradadores de tereftalato de polietileno (PET) en medio ambiente combinado, (Tesis de grado) Instituto Politécnico Nacional Unidad Interdisciplinaria de Biotecnológica. México, D.F. Recuperada de:
<https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/14439/ProyectoFinal.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Arefian, M., Tahmourespour, A., Zia, M., (2020) Polycarbonate biodegradation by newly isolated Bacillus strains. *Arch. Environ. Prot.* 14-20. <https://doi.org/10.24425/aep.2020.13252>
- Artham, T. & Doble, M. (2008). La biodegradación de policarbonatos alifáticos y aromáticos. *Macromolecular Bioscience* 8 (1): 14-24.
- Auta, H.S., Emenike, C.U., Jayanthi, B., Fauziah, S.H., (2018) Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by Bacillus sp. and Rhodococcus sp. isolated from mangrove sediment. *Mar. Pollut. Bull.* 127, 15-21. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.036>
- Balasubramanian V, Natarajan K, Hemambika B, Ramesh, N, Sumathi CS, Kottaimuthu R, y Rajesh Kannan V. (2010). Polietileno de alta densidad (HDPE) bacterias degradantes potenciales de los ecosistemas marinos de Golfo de Mannar, India. *Letras en Microbiología Aplicada* 51: 205-211

- Bardají, D., Moretto, J., Furlan., & Stehling, E. (2020). A mini-review: current advances in polyethylene biodegradation. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 36(2). DOI:10.1007/s11274-020-2808-5
- Basu, S., Rabara, R., Negi, S., Shukla, P. (2018). Ingeniería de PGPMO mediante edición de genes y biología de sistemas: Una solución para fitorremediación. *Tendencias Biotechnological*.
- Biffinger, J.C., Barlow, D.E., Pirlo, R.K., Babson, D.M., Fitzgerald, L.A., Zingarelli, S., Nadeau, L.J., CrookesGoodson, W.J. et al. (2014) A direct quantitative agarplate based assay for analysis of *Pseudomonas protegens* Pf5 degradation of polyurethane films. *Int Biodeterior Biodegrad* 95, 311–319
- Biffinger, J.C., Barlow, D.E., Cockrell, A.L., Cusick, K.D., Hervey, W.J., Fitzgerald, L.A., Nadeau, L.J., Hung, C.S. et al. (2015) The applicability of Impranil DLN for gauging the biodegradation of polyurethanes. *Polym Degrad Stab* 120, 178–185.
- Blum, C., Bunke, D., Hungsberg, M., Roelofs, E., Joas, A., Joas, R., Blepp, M., Stolzenberg, H. (2017). The concept of sustainable chemistry: key drivers for the transition toward sustainable development. *Sustain Chem Pharm*, 5:94-104.
- Bombelli, P., Howe, C., Bertocchini, F. (2017). Polyethylene biodegradation by caterpillars of the wax moth *Galleria mellonella*. *Curr Biol*, 27. 292-293.

- Bollinger, A., Thies, S., Katzke, N., & Jaeger K. (2018). The biotechnological potential of marine bacteria in the novel lineage of *Pseudomonas pertucinogena*. *Microb Biotechnol*
DOI:10.1111/1751-7915.13288
- Brandon, A., Gao, S., Tian, R., Ning, D., Yang, S., Zhou, J., Wu, W., Criddle, C. (2018).
Biodegradation of polyethylene and plastic mixtures in mealworms (larvae of *Tenebrio molitor*)
and effects on the gut microbiome. *Environ Sci Technol*, 52: 6526-6533
- Cesar de Faria, P. Wisbeck, E. Pereira, L. (2015). Biodegradación de polipropileno reciclado (PPR) y poli
(Tereftalato de etileno) reciclado (PETR) por *Pleurotus ostreatus*. (Río J.) vol.20 no.2 Río de
Janeiro Apr. /June 2015. Recuperado de:
http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762015000200452.
- Clukey, K., Lepczyk, C., Balazs, G., Work T., Li, Q., Bachman, M., Lynch, J. (2018). Contaminantes
orgánicos persistentes en la grasa de tres especies de tortugas marinas capturadas con palangre
pelágico del Pacífico: Acumulación en relación con los desechos marinos, plásticos ingeridos.
Sci. Entorno total. 610, 402-411.
- Cregut, M., Bedas, M., Durand, M.J. and Thouand, G. (2013) New insights into polyurethane
biodegradation and realistic prospects for the development of a sustainable waste recycling
process. *Biotechnol Adv* 31, 1634–3647

- Critchell, K., Bauer-Civiello, A., Benham, C., Berry, K. (2019). Contaminación plástica en el medio costero: desafíos actuales y soluciones futuras. *Costas y Estuarios*. 595-609. DOI: 10.1016 / B978-0-12-814003-1.00034-4.
- Deepika, S & Jaya, M. (2015). Biodegradation of low density polyethylene by microorganisms from Garbage soil. *J. Exp Bio Agri Sci*, 3. 15-21.
- Devi, R.S., Kannan, V.R., Natarajan, K., Nivas, D., Kannan, K., Chandru, S. and Antony, A.R. (2016) The role of microbes in plastic degradation. In *Environ Waste Manage* ed. Chandra, R. pp. 341–370 United States: CRC Press
- Danso, D., Chow1, J & Wolfgang R. (2019). Plastics: Microbial Degradation, Environmental and Biotechnological 2 Perspectives. *Appl Environ Microbiol*. 85 (19): e01095-19. Doi: 10.1128 / AEM.01095-19
- ECOMUNDO. (2011). Espacio de comunicación sobre el Medio Ambiente y desarrollo sostenible a nivel Nacional e Internacional. En línea: <http://www.epa.gov/>.
- Franden, M., Jayakody, L., Li, W., Wagner, N., Cleveland, N., Michener, W., Hauer, B., Blank, L., Wierckx, N., Klebensberger, J. (2018). Engineering *Pseudomonas putida* KT2440 for the efficient ethylene glycol utilization. *Metab Eng*, 48: 197-207.

- Gajendiran, A., Krishnamoorthy, S & Abraham, J. (2016). Microbial degradation of low-density polyethylene (LDPE) by *Aspergillus clavatus* strain JASK1 isolated from landfill soil. *Biotech* 6:52. DOI 10.1007/s13205-016-0394-x
- Gaytán, I., Sánchez-Reyes, A., Burelo, M., Vargas-Suárez, M., Liachko, I., Press, M., Sullivan, S., CruzGómez, M.J., Loza-Tavera, H., (2020) Degradation of recalcitrant polyurethane and xenobiotic additives by a selected landfill microbial community and its biodegradative potential revealed by proximity ligationbased metagenomic analysis. *Front. Microbiol.* 10, 2986. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02986>.
- Gilan, I., Sivan, A., (2013) Effect of proteases on biofilm formation of the plastic-degrading actinomycete *Rhodococcus ruber* C208. *FEMS Microbiol. Lett.* 342, 18-23. <https://doi.org/10.1111/1574-6968.12114>
- Gohain, A., Manpoong, C., Saikia, R., De Mandal, S., (2020) Actinobacteria: diversity and biotechnological applications, in: De Mandal, S., Bhatt, P., (Eds.), *Recent Advancements in Microbial Diversity*. Elsevier, Amsterdam, pp. 217-231. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821265-3.00009-8>
- Gómez, J. (2016). Diagnóstico del impacto del plástico- botellas sobre el medio ambiente: Un estado del arte. Universidad Santo Tomas, Cundinamarca. Recuperadode: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/10047/Gomez2016.pdf?sequence=1>.

- Gómez, J & Oliveros, C. (2016). Biodegradación de polietileno de Tereftalato por microorganismos aislados de sitios de disposición final de residuos sólidos, Táchira, Venezuela. Recuperado de: <http://produccioncientificaluz.org/index.php/redieluz/article/view/23646/24017>.
- Gravouil, K., Ferru-Clément, R., Colas, S., Helye, R., Kadri, L., Bourdeau, L., Moumen, B., Mercier, A., Ferreira, T. (2017). Transcriptomics and lipidomics of the environmental strain *Rhodococcus ruber* point out consumption pathways and potential metabolic bottlenecks for polyethylene degradation. *Environ Sci Technol*, 51: 5172-5181.
- Hajighasemi, M., Tchigvintsev, A., Nocek, B., Flick, R., & Popovic, A., et al. (2018). Screening and characterization of novel polyesterases from environmental metagenomes with high hydrolytic activity against synthetic polyesters. *Environ Sci Technol* 52:12388–12401. DOI: 10.1021/acs.est.8b04252.
- Ho, B.T., Roberts, T.K., Lucas, S., (2018) An overview on biodegradation of polystyrene and modified polystyrene: the microbial approach. *Crit. Rev. Biotechnol.* 38, 308-320. <https://doi.org/10.1080/07388551.2017.1355293>.
- Hofrichter, M. Lundell, T. & Hatakka, A. (2001). La conversión de madera de pino blanqueado por el manganeso peroxidasa de radiata *Phlebia*. *Applied and Environmental Microbiology* 67: 4588-4593.

Horton, A., Walton, A., Spurgeon, D., Lahive, E., Svendsen, C. (2017). Microplásticos en entornos terrestres y de agua dulce: Evaluación de la corriente, compresión para identificar las lagunas de conocimientos y las futuras prioridades de investigación. *Sci. Entorno total*, 586, 127-144.

Iram, D., Riaz, RA., Iqbal RK (2019) Usage of Potential Micro-organisms for Degradation of Plastics. *Open J Environ Biol* 4(1): 007-0015. DOI: <http://dx.doi.org/10.17352/ojeb.000010>

Jaiswal, S., Sharma, B & Shukla, P. (2019). Integrated approaches in microbial degradation of plastic. *Environmental Technology&Innovation* 17. DOI: 10.1016/j.eti.2019.100567

Jabloune, R., Khalil, M., Moussa, I.E.B., Simao-Beaunoir, A.M., Lerat, S., Brzezinski, R., Beaulieu, C., (2020) Enzymatic degradation of p-Nitrophenyl esters, polyethylene terephthalate, cutin, and suberin by Sub, a suberinase encoded by the plant pathogen *Streptomyces scabies*. *Microbes Environ.* 35, ME19086. <https://doi:10.1264/jsme2.ME19086>.

Kale, S., Desmukh, A., Dudhare, M., Patil, V. (2015). Microbial degradation of plastic: a review. *J. Biochem.* 952-961

Kawai F, Oda M, Tamashiro T, Waku T, Tanaka N, Yamamoto M, Mizushima H, Miyakawa T, Tanokura M. (2014). A novel Ca²⁺-activated, thermostabilized polyesterase capable of hydrolyzing polyethylene terephthalate from *Saccharomonospora viridis* AHK190. *Appl Microbiol Biotechnol* 98:10053–10064. doi:10.1007/s00253-014-5860-y

Khan, A., Majeed, T. (2019). BIODEGRADATION OF SYNTHETIC AND NATURAL PLASTICS BY MICROORGANISMS: A MINI REVIEW. Department of Biotechnology, Kinnaird College for Women, Lahore, Pakistan

Kijchavengkul, T. & Auras R. (2008). Perspectiva: Compostabilidad de polímeros. *Polímero Internacional* 57 (6): 793-804.

Kong, H., Kim, HH., Chung, J., Jun, J., Lee, S., Kim, HM., Jeon, S., Park, S., Bhak, J., Ryu, C. (2019). The *Galleria mellonella* hologenome supports microbiota-independent metabolism of long-chain hydrocarbon beeswax. *Cell rep*, 26: 2451-2464. e5.

Lambert, S & Wagner, M. (2017). Environmental performance of biobased and biodegradable plastics: the road ahead. *Chem Soc Rev*, 46: 6855-6871.

Lebreton, L., & Andrady, A. (2019). Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. *Palgrave Communications*, 5(1), 1-11.

Lwanga, E.H., Thapa, B., Yang, X., Gertsen, H., Salánki, T., Geissen, V., Garbeva, P., (2018) Decay of low-density polyethylene by bacteria extracted from earthworm's guts: a potential for soil restoration. *Sci.Total Environ.* 624, 753-757. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.144>.

Mahon, A., Connell, B., Healy, M., Connor, I., Officer, R., Nash, R., Morrison, L. (2017). Microplastic in sewage sludge: effects of treatment. *Enviro Sci Technol*, 51: 810-818.

- Mayer, M. & Staples, C. (2002). Lacasas, nuevas funciones para una vieja enzima. *Fitoquímica* 60: 561-565.
- Mehmood, C. T., Qazi, I. A., Hashmi, I., Bhargava, S., & Deepa, S. (2016). Biodegradation of low density polyethylene (LDPE) modified with dye sensitized titania and starch blend using *Stenotrophomonas pavanii*. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 113, 276–286. doi:10.1016/j.ibiod.2016.01.025
- Mendez, C. Vergary, G. Béjar, Vilma. Cárdenas, K. (2007). Aislamiento y caracterización de micromicetos biodegradadores de polietileno. *Rev. Perú. biol. Número especial* 13(3): 203 – 205. Recuperado de: <http://www.scielo.org.pe/pdf/rpb/v13n3/v13n03a08>.
- Mohan, A.J., Sekhar, V.C., Bhaskar, T. and Nampoothiri, K.M. (2016) Microbial assisted shigh impact polystyrene (HIPS) degradation. *Bioresour Technol* 213, 204–207.
- Mrowiec, B. (2017). Contaminantes plásticos en el medio acuático. *Ochrona Srodowiska i Zasobów Nat.* 28, <http://dx.doi.org/10.1515/oszn-2017-0030>.
- Muhonja, C. N., Makonde, H., Magoma, G., & Imbuga, M. (2018). Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya. *PLOS ONE*, 13(7), e0198446. doi:10.1371/journal.pone.0198446

Mukherjee, K., Tribedi, P., Chowdhury, A., Ray, T., Joardar, A., Giri, S. and Sil, A.K. (2011) Isolation of a *Pseudomonas aeruginosa* strain from soil that can degrade polyurethane diol. *Biodegradation*

Narancic, T & O'connor, K. (2017). Microbial biotechnology addressing the plastic waste disaster. *Microb Biotechnolo*, 10: 1232.1235.

Osman, M., Satti, S.M., Luqman, A., Hasan, F., Shah, Z., Shah, A.A., (2018) Degradation of polyester polyurethane by *Aspergillus* sp. strain S45 isolated from soil. *J. Polym. Environ.* 26, 301-310. <https://doi.org/10.1007/s10924-017-0954-0>.

Pathak, V. (2017). Review on the current state of polymer degradation: a microbial approach. *Bioresour. Bioprocess.* 4(15)

PNUMA. (2018). Plásticos de un solo uso: una hoja de ruta para la sostenibilidad.

Puglisi, E., Romaniello, F., Galletti, S., Boccaleri, E., Frache, A., Cocconcelli, P.S., (2019) Selective bacterial colonization processes on polyethylene waste samples in an abandoned landfill site. *Sci. Rep.* 9, 1- 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50740-w>

Purwaningrum, P. (2016). Upaya Mengurangi Timbulan Sampah Plastik di Lingkungan. *Revista indonesia de tecnología urbana y ambiental.* 8 (2): 141-7.

Rajendran, S. Kannan, V. Natarajan, K. Arokiaswamy, R. Durai, N. Chandru, S (2015). The Role of Microbes in Plastic Degradation. *Environmental Waste Management* Chapter: 12.

Recuperado de:

https://www.researchgate.net/publication/296896016_The_Role_of_Microbes_in_Plastic_Degradation.

Raziyafathima, M., Praseetha, P., Rimal Isaac, R. (2016). Degradación microbiana de desechos plásticos: Una revisión. *J Pharma. Chem. Biolo. Sci.* 4, 231-242.

Ruiz, C., Main, T., Hilliard, N.P. and Howard, G.T. (1999) Purification and characterization of two polyurethanase enzymes from *Pseudomonas chlororaphis*. *Int Biodeterior Biodegrad*

Santillo, D., Miller, K., Johnston, P. (2017) Microplastics as contaminants in commercially important seafood species. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 13(3):516–521.

Santo, M., Weitsman, R., Sivan, A. (2013). The role of the copper-binding enzyme-laccase-in the biodegradation of polyethylene by the *Rhodococcus ruber*. *Int. Biodeterioration Biodegrad.* 84, 204-210.

Satlewal, A., Soni, R., Zaldi, M., Shouche, Y., Goel, R. (2008). Biodegradación comparativa de HDPE y LDPE utilizando un consorcio microbiano. *J. Microbiol. Biotechnol.* 18, 477-482.

Shah, A., Hasan, F., Hameed, A. y Ahmed, S. (2008). Biological degradation of plastics: A comprehensive review. DOI:10.1016/j.biotechadv.2007.12.005

- Shah, A. (2007). Role of microorganisms in biodegradation of plastics. Quaid-i-Azam University, Islamabad.
- Shah, Z., Gulzar, M., Hasan, F. and Shah, A.A. (2016) Degradation of polyester polyurethane by an indigenously developed consortium of *Pseudomonas* and *Bacillus* species isolated from soil. *Polym Degrad Stab* 134, 349–356.
- Shimao M. (2001). La biodegradación de los plásticos. *Current Opinion in Biotechnology* 12: 242.
- Silva, A., Costa M., Duarte A. (2018). Biotechnology advances for dealing with environmental pollution by micro(nano)plastics: Lessons on theory and practices. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 1:30-35.
- Sutton, R., Mason, S., Stanek, S., Willis-Norton, E., Wren, I., Box, C. (2016). Microplastic contamination in the San Francisco Bay, California, USA. *Mar Pollut Bull*, 109: 230-235.
- Tasic, S., Kojic, M., Obradovic, D., & Tasic, I. (2014). Molecular and biochemical characterization of *Pseudomonas putida* isolated from bottled uncarbonated mineral drinking water. *Archives of Biological Sciences*, 66(1), 23–28. Recuperado de: <http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0354-4664/2014/0354-46641401023T.pdf>
- Tribedi, P. & Sil, A.K. (2013). Bioaugmentation of polyethylene succinate-contaminated soil with *Pseudomonas* sp. AKS2 results in increased microbial activity and better polymer degradation. *Env Sci Pollut Res* 20, 1318–1326.

Urbanek, K., Rymowicz, W., Miro, A. (2015) Aislamiento y caracterización de microorganismos árticos que descomponen bioplásticos. *Bioplásticos* 1–11.

Urbanek, A.K., Rymowicz, W., Mirończuk, A.M., (2018) Degradation of plastics and plastic-degrading bacteria in cold marine habitats. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 102, 7669-7678.
<https://doi.org/10.1007/s00253-018-9195-y>

Uribe, D. Giraldo, D. Gutiérrez, S. Merino, F. (2010). Biodegradación de polietileno de baja densidad por acción de un consorcio microbiano aislado de un relleno sanitario, Lima, Perú; *Rev. Perú. biol.* Vol.17 Número 1. Recuperado de:
http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-99332010000100017.

Usman, M.A., Momohjimoh, I., Usman, A.O., (2020) Mechanical, physical and biodegradability performances of treated and untreated groundnut shell powder recycled polypropylene composites. *Mater. Res. Express* 7, 035302. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab750e>

Varjani, S., & Upasani, V. (2017). A new look on factors affecting microbial degradation of petroleum hydrocarbon pollutants. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 120, 71-83.

Vertus, D., Ruiz, M., Henriquéz, J., Ortiz, V. (2017). Biodegradación bacteriana de polietileno y propuesta de aplicación en Cerro Patacón. *Rev.de iniciación científica.* (1):1

- Vivi, V., Martins, S & Attiii, D. (2018). Biodegradation of PCL and PVC: *Chaetomiium globosum* (ATCC 16021). *Folia Microbiol. (Praha)* 1-7
- Volke-Sepúlveda, T., Saucedo, G., Gutiérrez, M., Manzur, A. (2002). Thermally treated low density polyethylene biodegradation by *Penicillium pinophilum* and *Aspergillus niger*. *Journal Applied polymers science*, vol. 83, p. 305–314. Recuperado de: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.2245>.
- Wei, R & Zimmermann, W. (2017). Microbial enzymes for the recycling of recalcitrant petroleum-based plastics: how far are we? *Microb Biotechnolo*, 10: 1308-1322.
- Wei R, Oeser T, Then J, Kuhn N, Barth M, Schmidt J, Zimmermann W. 2014. Caracterización funcional y modelado estructural de hidrolasas sintéticas degradantes de poliéster de *Thermomonospora curvata*. *AMB expreso* 4 : 44. doi: 10.1186 / s13568-014-0044-9
- Wierckx, N., Narancic, T., Eberlein, C., Wei, R., Drzyzga, O., Magnin, A., Ballerstedt, H., Kenny, S., Pollet, E., Averous, L. (2018). Plastic biodegradation: challenges and opportunities. In *Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology Consequences*. Edited by Steffan, R., Springer International Publishing; 1-30
- Wilkes, R & Aristilde, L. (2017). Degradación y metabolismo de plásticos sintéticos y productos asociados por *Pseudomonas sp*, capacidades y desafíos. *J. Appl. Microbiol.* 123, 582-593.

- Yang, J., Yang, Y., Wu, M., Zhao, J., Jiang, L. (2014). Evidence of polyethylene biodegradation by bacterial strains from the guts of plastic-eating waxworms. *Environ Sci Technol*, 48: 13776-13784.
- Yang, S., Brandon, A., Andrew, J., Yang, J., Ning, D., Cai, S., Fan, H., Wang, Z., Ren, J., Benbow, E. (2018). Biodegradation of polystyrene wastes in yellow mealworms (larvae of *Tenebrio molitor* Linnaeus): factors affecting biodegradation rates and the ability of polystyrene-fed larvae to complete their life cycle. *Chemosphere*, 191: 979-989.
- Yang, Y., Yang, J., Wu, W., Zhao, J., Song, Y., Gao, L., Yang, R., Jiang, L. (2015). Biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic-eating mealworms. 2 role of gut microorganisms. *Environ Sci Technol*, 49: 12087-12093.
- Y, Kim., Y, Rhee. (2003). Biodegradation of microbial and synthetic polyesters by fungi. *Applied microbiology and Biotechnology*, vol. 61, pp. 300-308, 2003. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00253-002-1205-3>.
- Yee, K., Jansen, L., Lajoie, C., Penner, M., Morse, L., Kelly, C. (2018). Furfural and 5- hydroxymethyl-furfural degradation using recombinant manganese peroxidase. *Enzyme Microbial Technol.* 108, 59-65

Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y., Toyohara, K., Miyamoto, K., Kimura, Y., Oda, K., (2016) A bacterium that degrades and assimilates poly (ethylene terephthalate). *Science* 351, 1196-1199. <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

Yuan, J., Ma, J., Sun, Y., Zhou, T., Zhao, Y., & Yu, F. (2020). Microbial degradation and other environmental aspects of microplastics/plastics. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136968

Zhang, J., Gao, D., Li, Q., Zhao, Y., Li, L., Lin, H., Bi, Q., Zhao, Y., (2020) Biodegradation of polyethylene microplastic particles by the fungus *Aspergillus flavus* from the guts of wax moth *Galleria mellonella*. *Sci. Total Environ.* 704, 135931.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.13593>.

