



**UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO VICERRECTORADO DE
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

MAESTRÍA EN QUÍMICA APLICADA

**Informe de investigación previo a la obtención del título de:
Magíster en Química Aplicada**

**Tema: " EVALUACIÓN DE LOS CAMBIOS ESTRUCTURALES DE
PLÁSTICOS DE UN SOLO USO, POR EFECTO DE LA
BIODEGRADACIÓN"**

AUTOR: Ing. Isis Cedeño Cuellar

DIRECTOR TFM: Ph.D Juan Valenzuela Cobos

Milagro, 4 de mayo 2023

ECUADOR

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Por la presente hago constar que he analizado el proyecto de informe de investigación presentado por la Ing. ISIS CEDEÑO CUELLAR que se presenta con el tema "Evaluación de los cambios estructurales de plásticos de un solo uso, por efecto de la biodegradación" para la obtención del título de Magíster en Química Aplicada, el cual acepto dar el acompañamiento correspondiente a la estudiante, durante la etapa de desarrollo del trabajo hasta su presentación, evaluación y sustentación.

Milagro, a los 14 días del mes de noviembre de 2022

Ph.D Juan Valenzuela Cobos
C.I. 0927981670

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

El autor de esta investigación declara ante el Comité Académico del Programa de Maestría en Química Aplicada de la Universidad Estatal de Milagro, que el trabajo presentado es de mi propia autoría, no contiene material escrito por otra persona, salvo el que está referenciado debidamente en el texto; parte del presente documento o en su totalidad, no ha sido aceptado para el otorgamiento de cualquier otro Título de una institución nacional o extranjera.

Milagro, a los 4 días del mes de mayo de 2023

ING. ISIS CEDEÑO CUELLAR
CI. 0961811007

CERTIFICACIÓN DE LA DEFENSA

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO DIRECCIÓN DE POSGRADO CERTIFICACIÓN DE LA DEFENSA

El TRIBUNAL CALIFICADOR previo a la obtención del título de **MAGÍSTER EN QUÍMICA APLICADA**, presentado por **ING CEDEÑO CUELLAR ISIS**, otorga al presente proyecto de investigación denominado "EVALUACIÓN DE LOS CAMBIOS ESTRUCTURALES DE PLÁSTICOS DE UN SOLO USO, POR EFECTO DE LA BIODEGRADACIÓN", las siguientes calificaciones:

TRABAJO DE TITULACION	60.00
DEFENSA ORAL	33.67
PROMEDIO	93.67
EQUIVALENTE	Muy Bueno



DELIA DOLORES
NORIEGA VERDUGO

Mgtr. NORIEGA VERDUGO DELIA DOLORES
PRESIDENTE/A DEL TRIBUNAL



MARIA FERNANDA
GARCÉS MONCAYO

Msc GARCÉS MONCAYO MARÍA FERNANDA
VOCAL



VERONICA ESTEFANIA
MONSERRATE MAGGI

MONSERRATE MAGGI VERONICA ESTEFANIA
SECRETARIO/A DEL TRIBUNAL

DEDICATORIA

Se lo dedico especialmente a mis hijos que son mi fuente de inspiración y mis ganas de superarme y ser su ejemplo a seguir y a mis padres y mi esposo por su amor y apoyo incondicional.

Isis Cedeño Cuellar

AGRADECIMIENTO

A Dios Padre Omnipotente. Por ser guía, fuente de sabiduría y discernimiento confiable, quien me ayudó a culminar con éxito una etapa más de mi vida.

A mis hijos. Principalmente a mi hijo mayor que vivió todo este largo proceso, portándose muy bien y siendo paciente aún cuando no podía dedicarme a él por completo y a mi hija que llegó al final del proceso, pero igualmente me dio todo el tiempo necesario para culminar y son mis ganas de salir adelante.

A mi esposo. Por todo su amor, paciencia, ayuda y por darme esa fortaleza a mitad del camino, cuando pensé que no podía seguir adelante.

A mis padres y hermano. Gracias infinitas por confiar en mí y ser el pilar fundamental en mi vida, por apoyarme en cada momento con firmeza y constancia. Han estado a mi lado en cada momento de este camino.

A mi suegra. Por preocuparse aún estando lejos y ayudarme tanto durante su estancia en este país, al igual que mi abuela y mi tía.

A la Dr. Nardy Del Valle Diez García. Mi tutora externa, por haberme ayudado tanto cuando nadie más lo hizo y compartido conmigo sus conocimientos y su tiempo, además de su direccionamiento, consejos y apoyo para culminar con éxito el presente trabajo de titulación.

Al Dr. José Oreste Guerra De León y la Dra. Irenia Gallardo. Mis eternos profesores que desde Cuba me ayudaron con temas que se me hacían difíciles y siempre estuvieron pendientes para brindarme su apoyo incondicional.

A nuestros profesores. Por compartir sus conocimientos con nosotros y formarnos para concluir con éxito esta etapa.

A mis amigos. Talhita y Mario, por estar pendientes de mi avance, ayudarme y asesorarme tanto, para poder culminar mi tesis.

Isis Cedeño Cuellar

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Doctor

Fabrizio Guevara Viejó

Rector de la Universidad Estatal de Milagro

Presente.

Mediante el presente documento, libre y voluntariamente procedo a hacer la Cesión de Derecho de Autor del Trabajo realizado como requerimiento para la obtención del mi Título de Cuarto Nivel, cuyo tema fue " Evaluación de los cambios estructurales de plásticos de un solo uso, por efecto de la biodegradación" y que corresponde al Vicerrectorado de Investigación y Posgrado

Milagro, a los 4 días del mes de mayo de 2023

ING. ISIS CEDEÑO CUELLAR

CI. 0961811007

ÍNDICE GENERAL

Contenido

ACEPTACIÓN DEL TUTOR	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN	iii
CERTIFICACIÓN DE LA DEFENSA.....	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR	viii
ÍNDICE GENERAL.....	ix
Índice de Figuras	xii
Resumen	xiii
Abstract	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
Capítulo I: El problema de la investigación.....	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Formulación del problema	2
1.3 Objetivo general	2
1.4 Objetivos específicos.....	2
1.5 Justificación.....	2
CAPÍTULO II: Marco teórico referencial	5
2.1 Antecedentes.....	5
2.2 Contenido teórico que fundamenta la investigación	9
2.2.1 Plásticos de un solo uso	9
2.2.2 Poliestireno Expandido	14
2.2.3 Degradación microbiana.....	18

2.2.4 Espectroscopia de absorción FTIR.....	20
CAPÍTULO III: Diseño metodológico	23
3. Metodología.....	23
3.1 Investigaciones preliminares	23
3.2 Diseño del experimento.....	24
3.3 Evaluación de la biodegradación.....	25
3.3.1 Determinación de la biomasa	25
3.3.2 Análisis por microscopía.....	25
3.3.3 Espectrometría infrarroja (FTIR).....	26
3.4 Análisis estadístico.....	27
CAPÍTULO IV: Análisis e interpretación de resultados	28
4.1 Determinación de la biomasa.....	28
4.2 Análisis de microscopía.....	33
4.3 Análisis de la Espectrometría infrarroja (FTIR).....	34
4.3.1 Análisis del espectro del Poliestireno Expandido.....	34
4.3.2 Análisis del espectro del Poliestireno Expandido Fotooxidado.....	35
CAPÍTULO V: Conclusiones y Recomendaciones	38
5.1 Conclusiones.....	39
5.2 Recomendaciones.....	40
Anexos.....	47

Índice de Tabla

Tabla 1: Análisis descriptivo de la biomasa.	28
Tabla 2: Análisis de varianza de las réplicas de la biomasa del experimento	29
Tabla 3: Análisis descriptivo a los 30 días.....	30
Tabla 4: Análisis de varianza de las réplicas de la biomasa a los 30 días del experimento.....	31

Índice de Figuras

Figura 1: Producción de plástico a nivel mundial.....	13	
Figura 2: Representación gráfica del diseño de experimentos	24	
Figura 3: Estereoscopio Zeiss	Figura 4: Microscopio Zeiss.....	26
Figura 5: Valores del peso inicial y final por réplicas	32	
Figura 6: Diferencia entre el peso inicial y final de la biomasa	32	
Figura 7: <i>Representación del poliestireno expandido fotooxidado en condiciones experimentales. Fotooxidado a tiempo cero (A); Fotooxidado después de 30 días (B)</i>	33	
Figura 8: <i>Representación del Espectro IR del Poliestireno Expandido</i>	34	
Figura 9: <i>Representación del Espectro IR del Poliestireno Envejecido</i>	35	
Figura 10: <i>Representación del Espectro Sobrepuesto</i>	36	

Resumen

El plástico puede demorar mucho tiempo en degradarse, su excesiva producción y el uso continuo están relacionados con problemas de contaminación ambiental, estos factores, hace pensar en la búsqueda de otras alternativas más amigables con el medio ambiente, estos elementos han conducido al desarrollo de una investigación con el objetivo de Evaluar los cambios estructurales de plásticos de un solo uso, por efecto de la biodegradación, utilizando espectroscopia de absorción FTIR, para minimizar impactos medioambientales. Por lo tanto se realizó un estudio tipo investigativo-experimental, en el Centro de Investigación Biotecnológica del Ecuador, perteneciente a la Escuela Superior Politécnica del Litoral. Se ha tenido en cuenta los resultados hallados en la biodegradación de los plásticos de un solo uso (fragmentos de platos de poliestireno expandido), siendo las investigaciones preliminares que sustentan el estudio. Se encontró como resultados de las mediciones del peso de los plásticos a los 30 días, la no aparición de diferencias significativas entre las réplicas. se observa como mayor valor inicial el de la réplica 3 (0.0151 g) lo que significa que inicialmente los plásticos no estaban cortados del mismo tamaño y este elemento puede influir en el peso del mismo, dos resultados son negativos (Réplica 2 y 3) y se debe fundamentalmente a la fragmentación del microplástico, el cual está constituido en capas, que irán siendo colonizadas por este consorcio microbiano. Se concluye que las condiciones seleccionadas para el tratamiento del plástico de un solo uso a partir de la exposición a un consorcio microbiano de 4 cepas de hongos y un consorcio biorremediador mostraron buenos resultados en cuanto a la degradación del sustrato, siendo el proceso previo de fotooxidación generador de una mejor degradación del material.

Palabras claves: Contaminación ambiental, biodegradación, plásticos de un solo uso, poliestireno expandido, espectroscopia.

Abstract

Plastic can take a long time to degrade, its excessive production and continuous use are related to environmental pollution problems, these factors suggest the search for other more environmentally friendly alternatives, these elements have led to the development of a Research with the objective of Evaluating the structural changes of single-use plastics, due to the effect of biodegradation, using FTIR absorption spectroscopy, to minimize environmental impacts. Therefore, an investigative-experimental study was carried out at the Biotechnological Research Center of Ecuador, belonging to the Escuela Superior Politécnica del Litoral. The results found in the biodegradation of single-use plastics (fragments of expanded polystyrene plates) have been taken into account, being the preliminary investigations that support the study. It was found as results of the measurements of the weight of the plastics at 30 days, the non-appearance of significant differences between the replicas. Replica 3 (0.0151 g) is observed as the highest initial value, which means that initially the plastics were not cut to the same size and this element can influence its weight, two results are negative (Replica 2 and 3) and It is mainly due to the fragmentation of the microplastic, which is made up of layers, which will be colonized by this microbial consortium. It is concluded that the conditions selected for the treatment of single-use plastic from exposure to a microbial consortium of 4 strains of fungi and a bioremediation consortium showed good results in terms of substrate degradation, the previous process being photo-oxidation. generator of a better degradation of the material.

Keywords: Environmental pollution, biodegradation, single-use plastics, expanded polystyrene, spectroscopy.

INTRODUCCIÓN

Es innegable la creciente preocupación que hoy en día acapara el tema relacionado con el uso de plásticos y las limitadas acciones que al respecto se observan, a pesar de existir leyes nacionales e internacionales que abarcan la temática y proponen soluciones para disminuir el impacto socioeconómico, ecológico y medioambiental que a corto, mediano y largo plazo se apreciará (Calderón, 2020).

Al mar llegan anualmente entre seis y ocho millones de toneladas de residuos, entre los cuales, los plásticos representan un poco más del 80 %, siendo una de las principales fuentes la terrestre, según datos aportados por la fundación holandesa The Ocean Cleanup. Dicha organización realiza asociaciones de trabajo con operadores locales de gestión de residuos en cada país y con organizaciones internacionales como por ejemplo con el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo con el objetivo de limpiar los océanos del mundo de plástico (The ocean cleanup, 2023).

Los múltiples agentes que contaminan el agua, provienen de diferentes fuentes y dentro de estos, los residuos plásticos de un solo uso, tienen un papel preponderante, siendo, según la World Wildlife Fund (WWF), alrededor de ocho millones de toneladas que son vertidas a los océanos, para luego ser convertidos en microplásticos, los cuales pueden formar parte de la comida ingerida (WWF, 2019).

En Latinoamérica, países como Chile y Perú se han sumado a la toma de iniciativas para minimizar el uso de materiales plásticos y concientizar a la población sobre el daño que esto provoca en el medio ambiente, generando campañas y proponiendo leyes en relación con el no uso y la reducción de plásticos en los establecimientos (Franco y Navarro, 2020).

El plástico puede demorar mucho tiempo en degradarse y su uso continuo unido al exceso ambiental de estos, el mal enfoque o aplicación del reciclaje, los ambientes no controlados o con inadecuada tecnología para los procesos de quema de plásticos, más los problemas de salud que cada vez más están relacionados con

estos factores, hace pensar en la búsqueda de otras alternativas más amigables con el medio ambiente para disminuir el exceso de estos materiales (Valdivia, 2022).

El cambio en las propiedades físicas y químicas debido a procesos como la fotodegradación o acción de la luz, la degradación mecánica o térmica, así como, la acción microbiana sobre los materiales plásticos ha sido una alternativa que se viene observando hace un tiempo y parece ser muy prometedora. Esta relación entre los polímeros y los microorganismos, va acompañado de varios procesos, donde la acción del oxígeno y la luz UV inician la ruptura de las cadenas carbonadas, obteniéndose moléculas más pequeñas susceptibles de ser transformados por el microbiota circundante (Rhodes, 2018).

En Ecuador, fue aprobada la Ley orgánica para la racionalización, reutilización y reducción de plásticos de un solo uso, en la cual se aborda la problemática global relacionada con el inadecuado manejo de residuos sólidos y los daños irreversibles que afectan a nuestro planeta de continuar como hasta ahora y sin tomar medidas eficaces para el manejo, consumo y producción. La norma también se acopla a la línea de la mayoría de países que abarcan la temática por lo cual se considera un paso de avance en esta importante lucha (Arzube, 2021).

Teniendo en cuenta lo anteriormente planteado, es objetivo de esta investigación evaluar los cambios estructurales de plásticos de un solo uso, por efecto de la biodegradación a partir de la utilización de un consorcio microbiano, aspecto que podrá ser relevante si se tiene en cuenta la contribución de esto a la minimización de residuos, los que generan en la actualidad un problema que se ha convertido en insostenible en el tiempo y que necesita soluciones urgentes y efectivas para superar los graves problemas que les tocará enfrentar a las generaciones futuras.

Capítulo I: El problema de la investigación

1.1 Planteamiento del problema

La contaminación por microplásticos no ha abordado suficientemente. Dentro de ellos, los productos a base de poliestireno han formado parte central de la preocupación mundial durante muchos años, en temas ambientales, debido a su difícil degradación, básicamente, los desechos se destruyen a través de la incineración, con la impronta de que ese enfoque libera una alta carga de contaminantes al aire, formando subproductos peligrosos, mutagénicos y provocando daño en los niveles tróficos.

En las investigaciones analizadas refieren la biodegradación del poliestireno como un proceso lento por parte de los organismos, hasta el presente los científicos continúan buscando herramientas más eficientes que aceleren el ritmo esencial, siendo esencial continuar con los estudios para determinar y aislar las cepas microbianas, ya que los contaminantes de desechos del poliestireno inundan el ambiente tanto el terrestre como el marino (Rybak, Stojanowska y Zeynalli, 2023).

Además en su comportamiento en el ambiente marino, el poliestireno expandido posee características diferentes a muchos termoplásticos y varían sus concentraciones, ubicación y la disponibilidad de varios metales y metaloides de importancia antropogénica y geoquímica, siendo consideradas concentraciones de Al, As, Co, Fe, Mn, Ni, Pb y Sb, lo cual sugieren que los metales acuosos pueden interactuar con la superficie del poliestireno expandido a través de una serie de mecanismos como la adsorción, atrapamiento o precipitación y migrar a través de su estructura porosa hacia el interior de la matriz polimérica acrecentando el problema de la contaminación (Twyford y Turner, 2023).

El poliestireno expandido se encuentra regularmente en el medio ambiente marino y entre todos los residuos plásticos su variabilidad espacial lo ha llevado a tener una gran presencia en este ambiente; en Asia alcanza, entre el 31 y el 40,4% del plástico en las playas y en las aguas superficiales marinas, siendo significativamente más

alto que en el resto del mundo, donde solo representa el 17,3% (Chan y No, 2023). Los argumentos expuestos sobre el incremento y uso de los desechos plásticos de un solo uso, se basan en referencias bibliográficas y datos que han permitido poner al descubierto un serio problema ambiental, no es solo una discusión teórica, puesto que han sido identificadas las causas de esta actual problemática y las nefastas consecuencias hacia el futuro del planeta.

1.2 Formulación del problema

¿Cómo influye en la estructura del poliestireno expandido, el crecimiento de microorganismos que faciliten su degradación y minimicen sus afectaciones al medio ambiente?

1.3 Objetivo general

Evaluar los cambios estructurales de plásticos de un solo uso, por efecto de la biodegradación, utilizando espectroscopía de absorción FTIR, para minimizar impactos medioambientales.

1.4 Objetivos específicos

- Valorar los cambios ocurridos en plásticos de un solo uso bajo condiciones de 500 ml del medio mineral, 10 gr del poliestireno expandido envejecido más inóculo (consorcio microbiano).
- Analizar cambios en el espectro de absorción FTIR, en las condiciones utilizadas para la degradación microbiana.

1.5 Justificación

Existen varios plásticos que se utilizan constantemente, entre los cuales resalta el Poliestireno Expandido o también conocido como EPS, este es un material espumado que fundamentalmente se utiliza para la construcción y en el área de

envase y embalaje. Desde el punto de vista científico, se ha venido expresando que el poliestireno afecta al medio ambiente, puesto que no tiene sustituto añadido por lo que su degradación demora notablemente en relación a otros materiales, los compuestos químicos de los que se hace uso para su producción afectan nuestro entorno, además este material se genera a partir de un material renovable, que es el petróleo.

Mundialmente se agudiza la problemática por el alto uso del poliestireno expandido, existiendo políticas para su reciclaje, leyes y prohibiciones que limitan el uso, sin embargo no han sido eficaces del todo ya que se deben considerar otros elementos al implementar estas políticas, fundamentalmente en los residuos plásticos de un solo uso se han convertido en una creciente preocupación y resulta trascendente cambiar el comportamiento de los consumidores, analizando desde una arista social, que enfoque el consumo sostenible, apreciando los siguientes factores: valores ecológicos del consumidor (visión personal), toma de decisiones del consumidor relacionada con los residuos plásticos (visión conductual), así como, las prohibiciones y programas de descuentos/recompensas (elemento ambiental) (Fischbach y Yauney 2023).

El trabajo se justifica también desde el aspecto metodológico ya que se conoce los pasos para la biodegradación del poliestireno expandido y en ello se fundamentan las perspectivas futuras para los estudios sobre la biodegradación, por lo tanto, se manifiesta que ha sido considerada entre las mejores soluciones de degradación de plásticos, siendo empleada desde la década del 1970, y al referirse a la biodegradación microbiana de poliestireno, se han utilizado bacterias derivadas de disímiles fuentes, como el suelo, sitios contaminados, vertederos de desechos plásticos, agua, entre otros.

En este aspecto, numerosos estudios coinciden en la posibilidad del uso de los microorganismos como las bacterias para ejecutar la biodegradación del poliestireno, las mismas, junto con los hongos, alcanzan aceptables niveles de degradación con sus enzimas secretadas sean extracelulares o intracelulares, ya que el poliestireno es un sustrato que les permite crecer y allí estos microorganismos van a ir descomponiéndolo en fragmentos moleculares más pequeños.

Es reconocido que el Ecuador se ha sumado constantemente a la lucha en contra del uso de productos que no sean biodegradables, por lo que tiene regulaciones y acuerdos ministeriales en los que se pretende concientizar a la población con el uso de estos materiales, pidiendo a las industrias productoras que se basen en la prevención y responsabilidad extendida y fomentando la producción de materiales reutilizables y reciclables que no afecten los ecosistemas.

Asimismo, diversos trabajos publicados explican la existencia de microorganismos que degradan la materia orgánica por lo que evaluar los cambios estructurales de estos plásticos a partir de la acción de estos microorganismos, puede ser una acción para evitar los daños que estos causana nuestro planeta.

Como seres humanos ponemos en peligro la subsistencia de varias especies yaque, de mantenerse la imperante situación, continuará el incremento del desecho de los plásticos de un solo uso, lo que afecta la salud y el bienestar de todos enel planeta. Así que es factible desarrollar el estudio ya que, se elevará el nivel educativo y su impacto será significativo en los valores ecológicos de los consumidores, sirviendo además como una guía para los tomadores de decisiones, quienes tienen que ver con la implementación de programas, políticas públicas y recursos educativos que contribuyan al bienestar de la población. La investigación recomienda áreas potenciales para futuros estudios.

CAPÍTULO II: Marco teórico referencial

2.1 Antecedentes

Actualmente el uso de los plásticos se está haciendo cada día mayor a nivel mundial, debido a que es un material al que se le confiere gran importancia y es muy útil en la vida moderna, se usa en la medicina, en los coches o para proteger alimentos de ser desperdiciados, es ligero, se fabrica fácil y económicamente, además tiene una gran durabilidad, por lo que lamentablemente esto lo convierte en un gran contaminante (Portocarrero, 2021). Por tal motivo se les considera una amenaza para el planeta, siendo los micro plásticos, para nuestros océanos de las más agresivas, debido a que han permeado las fuentes de agua desde los ríos hasta las profundidades de los océanos y en los glaciares (De-La-Torre, et al. 2019). En los ecosistemas terrestres suelen verse afectada también la flora y la fauna.

El poliestireno se utiliza ampliamente en todas las industrias. Es conocido que el poliestireno expandido (EPS) es uno de los residuos más frecuentes de la basura plástica; refiriéndose a la producción masiva de polímeros plásticos a escala global, Liu y colaboradores (2023), explican que su producción inició en la década de 1950 del siglo pasado y ha crecido a un ritmo del 8,4 % anual, generando con ello, mayores cargas de desechos contaminantes para el planeta, por lo que realizaron un estudio denominado “Biodegradación de poliestireno (PS) por bacterias marinas en ecosistema de manglares”, con el objetivo de mostrar la diversidad bacteriana de la comunidad microbiana que degrada el poliestireno de los vertederos en un área de manglares subtropicales; a partir de que estos tienden a flotar y llegan a acumularse formando parches de basura de plástico en áreas marítimas, planteando una gran amenaza para los ecosistemas marinos. En el estudio incluyeron poliestireno de uso general (GPPS), poliestireno expandido (EPS), poliestireno de alto impacto (HIPS) y poliestireno sindiotáctico (SPS). Entre ellos, era de suma importancia analizar el EPS, al ser el de mayor empleo en la acuicultura y en las cajas de empaque, generando una grave contaminación en las áreas costeras. Los poliestirenos fueron inoculados con los consorcios microbianos para observar la degradación, los cuales compartieron una estructura comunitaria similar, dominando el grupo de las siguientes bacterias:

Sphingomonadaceae, Rhodanobacteraceae, Rhizobiaceae, Dermacoccaceae, Rhodocyclaceae, Hyphomicrobiaceae y Methyloligellaceae, así como, otras que representan al primer miembro de los géneros de Novosphingobium, Gordonia, Stappia, Mesobacillus, Alcanivorax, Flexivirga, Cytobacillus, Thioclava y Thalassospira, demostrando como cultivo puro, su capacidad de degradación del EPS. Además, la biodegradación se cuantificó por pérdida de peso, cambios morfológicos y estructurales evidentes de las películas del EPS observados. Como principales resultados encontraron que las tasas de degradación oscilaron entre el 2,7 % y el 7,7 % después de un mes en el laboratorio y posiblemente más bajas in situ, siendo innegable su papel en la eliminación de EPS.

Dentro de las ventajas que ofrecen los plásticos sintéticos se encuentran su uso en la construcción, producción de empaques, industria electrónica, entre otras, no obstante, su baja degradabilidad induce una grave contaminación que daña el medio ambiente, la salud humana y provoca cambios irreversibles en el ciclo ecológico. En tal sentido Zhang y colaboradores (2022) realizaron una amplia revisión del estado del arte con el objetivo de resumir los avances actuales en la biodegradación del poliestireno, ya que, coinciden en que la biodegradación es un novedoso y atractivo método para resolver los crecientes problemas generados por el exceso de desechos plásticos ante la continua producción mundial de estos, observada durante las últimas décadas, por lo tanto, es necesario tomar medidas que sean amigables con el ambiente, debido a su uso extensivo en las industrias y en la vida diaria. Los autores citados refieren que particularmente, los plásticos que contienen solo un esqueleto de carbono-carbono son menos susceptibles a la degradación, debido a la falta de grupos hidrolizables. Al ser el poliestireno un importante representante de ese grupo (abarcando alrededor del 40% de la producción total de plástico) se deben hacer esfuerzos para potenciar el reciclaje y la reutilización de estos plásticos. Como resultados aportan que el EPS se usa generalmente para empaques de espuma, vasos desechables y recipientes para alimentos. Resaltan que la tasa de biodegradación del plástico en la naturaleza es extremadamente baja y no satisfactoria. Así mismo, los autores coinciden en que para disminuir la acumulación de desechos plásticos y aumentar las tasas de reciclaje, la despolimerización del plástico en sus monómeros seguida de la resíntesis del mismo plástico o de uno nuevo es un buen método, continuando su exposición indicando el uso de organismos vivos y enzimas,

llamando cada vez más la atención su introducción para la biodegradación de plásticos, ya que pueden acelerar el proceso de degradación natural.

Existen diversos tipos de plásticos dentro de los cuales se encuentran el polietileno, el poliestireno expandido, el politereftalato de etilenglicol (PET), entre otros, siendo materiales plásticos ampliamente producidos a base de petróleo, lo que conlleva a una acumulación masiva en el medio ambiente. Aunque se ha informado sobre la degradación microbiana de estos, no se ha logrado labiodegradación completa o una degradación rápida en condiciones ambientales. En tal sentido Montazer y colaboradores (2020) han informado que los experimentos realizados poseen algunas limitaciones y la evidencia concluyente de la biodegradación completa por parte de los microorganismos en ocasiones ha sido esquiva. Los autores realizaron un estudio bibliográfico detallando diversas limitaciones que incluyen la falta de una definición de trabajo para la biodegradación, por lo cual se trazaron como objetivo describir los desafíos en los experimentos de degradación del polietileno y otros plásticos sintéticos, así como, aclarar los parámetros necesarios para lograr la biodegradación enfatizando en la necesidad de desarrollar una definición con base bioquímica para la biodegradación que simplifique la comparación de los resultados de los experimentos enfocados en la degradación microbiana del polietileno usado. Encontrando como resultados que se han ejecutado múltiples ensayos de degradación microbiana que incluyen el aislamiento de microorganismos de diferentes fuentes buscando el mejor poder microbiano potencial para degradar la cadena de PE polimérico, en los cuales los investigadores aislaron microorganismos de diferentes tipos de lugares como suelo de bosque, jardín, basureros, manglares, vertederos de residuos sólidos, aguas residuales o lodos cloacales entre otros. Concluyendo que el proceso de biodegradación está definido por cuatro etapas: biodeterioro, biofragmentación, bioasimilación y mineralización, siendo necesario para la biodegradación completa, una reducción en la masa molar y el número de masa molecular del polímero llegando a la fragmentación en moléculas más pequeñas que posteriormente son catabolizadas por microorganismos.

Continuando con la preocupación ambiental sobre la contaminación ambiental que provoca el exceso del plástico y sus efectos nocivos en varios ecosistemas, Bhanot y Panwar (2023), realizan una investigación donde revelando el potencial de *Lichtheimia ramosa* AJP11 para la micotransformación del sulfonato de poliestireno y su mecanismo molecular impulsor. Motivados por las limitaciones y deficiencias de las estrategias de gestión de residuos, la sobreacumulación de residuos plásticos, principalmente por compuestos plásticos de un solo uso como el poliestireno, se propusieron poner a prueba las ventajas de la biotransformación sobre los otros métodos de eliminación de plásticos en el panorama de la investigación moderna. Los autores plantean que la biotransformación de los plásticos implica su hidrólisis microbiana en oligómeros y monómeros de cadena corta que finalmente son asimilados como fuente de carbono por los microbios que conducen a la liberación de CO₂. Al analizar que los hongos poseen un sistema enzimático multifacético y altamente regulado, capaz de utilizar diversas fuentes de nutrientes, trataron como objetivo explorar el potencial de *Lichtheimia ramosa* hacia la micotransformación del sulfonato de poliestireno (PSS), un análogo estructural del poliestireno, en el estudio incubaron durante 30 días al AJP11 en medio mínimo de sal + PSS al 1%, como resultados encontraron que el hongo mostró un incremento del 41,6% en su biomasa de peso fresco, lo que indica la utilización de PSS como única fuente de carbono y en un análisis posterior revelaron la generación de varios metabolitos intermedios, como alcanos y ácidos grasos, siendo cruciales para el continuo de las rutas metabólicas de los hongos. Confirmándose la micotransformación de PSS, esos hallazgos abren nuevas vías para acelerar la eliminación de desechos de poliestireno.

Un trabajo realizado por Parthasarathy y colaboradores (2022), denominado Degradación de poliestireno por *Exiguobacterium* sp. RIT 594: evidencia preliminar de una vía que contiene una oxigenasa atípica, trató como objetivo realizar estudios de incubación, genómica, bioinformática y espectroscópicos, para mostrar evidencias de una desaromatización considerable del estireno junto con un aumento en los dobles enlaces no conjugados durante la degradación de poliestireno por la cepa *Exiguobacterium* sp. Destacando que fue elegido el poliestireno para el estudio al ser un polímero recalcitrante en términos de biodegradabilidad. Sin embargo, los autores plantean que, en la despolimerización inicial de PS a estireno, muchas

bacterias pueden degradar aún más esta molécula en condiciones aeróbicas, de allí que concluyeron que *Exiguobacterium* sp. RIT 594 degrada PS a través de la biotransformación de monómeros de estireno en 2-hidroxipenta-2,4-dienoato y ácido acrílico. Basando la explicación de los espectros IR observados en la oxigenación anular directa, donde el patrón de las señales de IR combinado con la presencia de una dioxigenasa que escinde el anillo y una hidroxilasa en el genoma es más consistente, implicando una hidroxilación inicial y una escisión del anillo catalizada por la misma enzima dioxigenasa, seguida de degradación a través de la actividad hidrolasa. En general, han propuesto una ruta corta y novedosa para la degradación de PS por *Exiguobacterium* sp. RIT 594. Recomendando realizar en el trabajo futuro la determinación de la identidad de las enzimas y aclarar si otras cepas de *Exiguobacterium* utilizan la misma vía para degradar PS.

2.2 Contenido teórico que fundamenta la investigación

2.2.1 Plásticos de un solo uso

Los plásticos de un solo uso son aquellos productos hechos de plástico, como bolsas, botellas y vasos que se utilizan una sola vez y luego se desechan. Debido a su facilidad en simplificar las acciones de las personas son muy comunes en la vida cotidiana, pero su uso excesivo es una de las principales causas de la contaminación que hay en el mundo. Estos productos no son biodegradables y, por lo tanto, su desecho en el medio ambiente contribuye al deterioro de los ecosistemas. Los plásticos se fabrican a partir de combustibles fósiles como el gas natural, el petróleo y el carbón y representan una producción creciente, lo que naturalmente conduce a un aumento de la contaminación del planeta (Puchol, 2021).

Los plásticos de un solo uso son comunes en muchos aspectos de la vida moderna, pero su uso masivo ha generado preocupación debido a sus efectos en el medioambiente. Debido a que estos plásticos se desechan con frecuencia después de un solo uso, pueden tardar cientos de años en descomponerse y pueden terminar en los océanos y otros ecosistemas naturales, donde pueden causar daños a la vida marina y a los hábitats naturales. Además, la producción y eliminación de estos plásticos también pueden generar emisiones de gases de efecto invernadero y otros

problemas ambientales (De Simone, 2020).

No obstante, el uso del plástico de un solo uso tiene una serie de impactos económicos negativos en diferentes áreas, entre los que se incluyen los costos de gestión de residuos, dado que, al ser utilizado en una gran variedad de productos aumenta la cantidad de residuos generados, lo que incrementa los costos de recolección, transporte y eliminación de estos. Asimismo, su acumulación puede afectar la calidad del agua, el suelo y el aire, así como también dañar los ecosistemas. Por lo que las medidas de limpieza y restauración de estos entornos naturales dañados puede tener un impacto económico negativo (Cornejo, 2020).

En consecuencia, al tener daños medioambientales estos plásticos pueden tener impactos negativos en la salud humana, especialmente cuando se utilizan en productos que entran en contacto con alimentos o medicamentos. La exposición a ciertos químicos presentes en estos plásticos puede tener un impacto negativo en la salud, lo que aumenta los costos asociados con la atención médica. Por otro lado, en el ámbito empresarial puede afectar la reputación de una empresa, especialmente si es vista como no sostenible o no ambientalmente responsable. Además, la implementación de alternativas más sostenibles puede aumentar los costos de producción (Murray et al. 2021).

2.2.1.1 Origen

Los plásticos son prácticamente una cadena de polímeros sintéticos, que se inventó a mediados del siglo XIX mediante de la industrialización, este fue un proceso de cambio principalmente en Europa y Estados Unidos. Para ese entonces, los profesionales en química ya tenían conocimiento acerca de los polímeros, compuestos que consisten en cadenas largas de moléculas unidas entre sí que hacen posible este tipo de manipulación. Dichas cadenas pueden ser naturales, como el almidón y la lignina. No obstante, no funcionaban de la mejor manera, en vista de aquello, el uso de cadenas sintéticas permitió la fabricación de productos resistentes a los impactos, resistentes al desgaste y a prueba de agua (Billmeyer, 2020).

Por ello, se consideró la celulosa, una macromolécula formada por unidades de glucosa unidas entre sí, a través de enlaces glucosídicos. Es un componente importante de la pared celular de las plantas, constituyendo una estructura resistente y rígida, siendo el polímero más abundante en la naturaleza, su función principal es la de dar soporte estructural a las plantas. La modificación química fue realizada por el estadounidense John Wesley Hyatt en 1870 en busca de un sustituto del marfil. A comienzos del siglo XX, el químico Hendrik Baekeland solicitó la patente mencionada para crear un nuevo compuesto, un poli oxi bencil metil en glicol anhídrido al que lo denominó "Baquelita" a partir de fenol y el formaldehído que producía un material duro (Rasmussen, 2021).

Conforme los años pasaron, los plásticos fueron evolucionando y siendo más indispensables en la vida de los seres humanos. Aproximadamente, para mediados del siglo XX se desarrolló el plástico de un solo uso como una forma fácil y económica de envasar productos, mismos que permiten a los fabricantes reducir los costos de embalaje sin sacrificar la calidad. Los plásticos desechables como también se los conoce se han hecho populares entre los minoristas y productores debido a su versatilidad y facilidad de uso, de tal forma que también se pueden encontrar en productos de limpieza, utensilios de comida, cajas de almacenamiento, juguetes y otros productos (Lindwall, 2020).

En la actualidad, los plásticos de un solo uso están presentes en todos los ámbitos de la vida cotidiana. Se utilizan en la industria alimentaria, en productos de higiene personal, para empaquetar productos farmacéuticos, para la fabricación de productos de belleza, limpieza y productos electrónicos. Estos son muy versátiles, ofrecen muchas ventajas económicas para la industria y están disponibles en una variedad de tamaños y formas. Sin embargo, estos plásticos también tienen algunos inconvenientes ambientales, ya que son difíciles de reciclar. Además, contienen compuestos químicos tóxicos que pueden contaminar el medioambiente. Por ello, es importante que sean reemplazados por productos responsables con el medioambiente, como los plásticos biodegradables y reciclables (Murray et al. 2021).

2.2.1.2 Usos

Los plásticos de un solo uso se utilizan para una variedad de aplicaciones, las más comunes incluyen envolturas para alimentos, envases para líquidos, bolsas de basura, de compras, utensilios, vasos, platos desechables y embalaje para productos. Una vez utilizados se desechan, lo que permite ser una opción de embalaje conveniente (Borda et al. 2020).

La cultura de usar y tirar se ejemplifica en los plásticos de un solo uso. En lugar de optar por bienes duraderos de calidad, se busca la comodidad a expensas de la durabilidad y los impactos a largo plazo. El uso excesivo de estos plásticos ha llevado a una acumulación asombrosa de residuos, con una producción anual global de 300 millones de toneladas de plástico, la mitad de los cuales son de artículos de un solo uso. Para evitar este desperdicio y sus consecuencias negativas, se debe reducir el uso del plástico en nuestras vidas diarias (Álvarez et al. 2021).

El uso de bolsas y botellas reutilizables es una excelente manera de hacerlo, reciclar el plástico también ayuda a reducir su impacto. Sin embargo, el 91% de todo el plástico no se recicla en absoluto y termina en vertederos o en el medioambiente. Los plásticos de un solo uso son particularmente problemáticos debido a su tamaño y dificultad para reciclar. Los centros de reciclaje a menudo no los aceptan debido a que no se ajustan a la maquinaria de reciclaje (Sánchez et al. 2021).

2.2.1.3 Producción a nivel mundial

La producción de plásticos a nivel mundial aumentó a un ritmo sostenido durante la última década, siendo así que el uso del plástico de un solo uso ha generado una enorme preocupación para el medio ambiente. El plástico es un material muy duradero, y una vez que se usa generalmente no se recicla, terminando así en la contaminación de los océanos, ríos, lagos y suelos. En consecuencia, la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2022) indicó que anualmente se producen 400 millones de toneladas de plástico y se prevé que para el 2040 esta cifra se duplique.

El consumo global de plástico se ha duplicado, esto se debe principalmente al aumento del uso de este producto en los sectores industriales y de consumo, así como al uso cada vez mayor de plásticos en países en desarrollo. La mayoría de la producción mundial de plástico se lleva a cabo en Asia, con China produciendo la mayor cantidad de plástico. Otros países importantes productores de plástico incluyen a los Estados Unidos, Alemania, Brasil, Italia, Turquía y México (Rojo & Montoto, 2017).

De acuerdo con el informe realizado por National Geographic cada minuto se venden un millón de botellas de plástico en todo el mundo, el 42% del plástico se utiliza en el envasado de alimentos y productos terminados. Es decir, plásticos de un solo uso que apenas pasan unos minutos en manos de los consumidores. Para 2018, China produjo alrededor del 30% de los plásticos de todo el planeta (Miranda, 2020).

A continuación, se presenta un cuadro estadístico acerca de la producción de plástico a nivel mundial en millones de toneladas métricas. En este se muestra cómo para el año 2020 se produjeron aproximadamente 370 millones de toneladas métricas. De dicha cantidad 55 millones fueron generados en Europa, incluyendo el uso de materiales termoplásticos y poliuretanos, y otros termoendurecibles, adhesivos, revestimientos y sellantes (Statista Research Department, 2022).

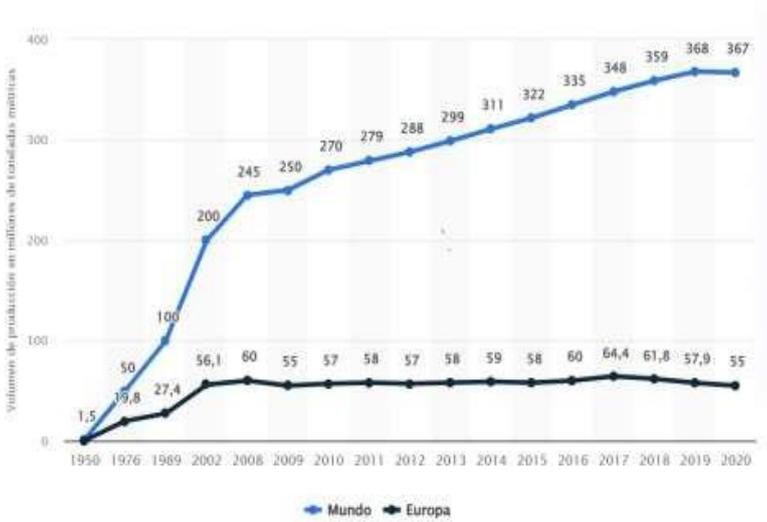


Figura 1: Producción de plástico a nivel mundial
 Nota. Tomado de Statista Research Department (2022).

2.2.2 Poliestireno Expandido

El poliestireno expandido (EPS) es una forma de plástico también llamado corcho blanco, Porexpan o Polyexpan, es un plástico espumado 98% aire, muy ligero ya la vez resistente. El EPS se utiliza comúnmente para aislar el calor en los techos, paredes y suelos por su aislamiento térmico y acústico. De la misma forma, se utiliza para rellenar huecos, articulaciones de ventanas y puertas, así como para embalajes y flotadores (Arthuz & Pérez, 2019).

El proceso de fabricación del EPS implica la creación de pequeñas cuentas de poliestireno que se expanden con vapor de agua y se fusionan juntas para formar bloques grandes. Estos bloques se pueden cortar y dar forma para crear productos como envases de alimentos, bandejas, aislamiento térmico para la construcción, juguetes y decoraciones de temporada, entre otros. Asimismo, es conocido por su ligereza, resistencia y capacidad para aislar el calor y el frío. Sin embargo, también es un material no biodegradable y puede tardar cientos de años en descomponerse en el medioambiente. Además, su producción y eliminación pueden tener impactos ambientales negativos, incluyendo la emisión de gases de efecto invernadero durante la producción y la contaminación de los océanos y otros ecosistemas cuando se desecha inadecuadamente (Chávez et al. 2022).

2.2.2.1 Producción

El proceso de producción para la obtención del poliestireno expandido utiliza como materia prima el poliestireno expandible, que se obtiene a partir de la polimerización del estireno en presencia de un agente espumante (pentano).

Este se realiza a partir de una resina de poliestireno termoplástico, que se expande con el vapor de agua para formar un material ligero y aislante. Esta se consigue con la ayuda de una máquina llamada extrusora que se encarga de mezclar la resina con el vapor de agua y otros aditivos para obtener una mezcla homogénea. A continuación, la mezcla se introduce en un molde de forma adecuada, dependiendo de la forma del producto final. Luego, se calienta hasta alcanzar la temperatura de expansión propicia y se introduce en una cámara de expansión para que se expanda

uniformemente. Finalmente, se enfría el material y se extrae del molde para obtener el poliestireno expandido (Barrera et al., 2017).

En función de su producción, es recomendable utilizar materias primas de alta calidad y pureza para la producción de poliestireno expandido. Esto puede ayudar a garantizar una calidad consistente del producto final y reducir el riesgo de fallas o defectos. Por ello, se debe prestar especial atención a la temperatura y los tiempos de procesamiento. Las variaciones en la temperatura y los tiempos de procesamiento pueden afectar la densidad y la calidad del producto final. En consecuencia, es importante mantener un estricto control de calidad durante todo el proceso de producción, desde la selección de materias primas hasta la fabricación y el almacenamiento del producto final. Esto puede ayudar a minimizar los riesgos de fallas o defectos y garantizar la calidad del producto final. Es importante mantener los equipos de producción en buen estado de funcionamiento y realizar el mantenimiento preventivo regularmente. Esto puede ayudar a minimizar los riesgos de fallas o interrupciones en la producción y garantizar la calidad del producto final, cabe destacar que se deben seguir todas las regulaciones y normas aplicables a la producción de poliestireno expandido, incluyendo las normas de seguridad y medioambiente (Chávez et al., 2022).

2.2.2.2. Usos en Ecuador

En Ecuador, el uso del poliestireno expandido es muy común para diversos fines, principalmente para la fabricación de embalajes y aislantes térmicos. Así como proteger los productos durante el transporte al ser un material ligero y protector. El EPS también se puede usar para fabricar pequeños productos como vasos, platos y cajas para almacenar alimentos (Rogontino et al., 2017).

Los ecuatorianos arrojan 531,461 toneladas de plástico cada año, de este más del 40% no se puede reutilizar, es decir, se utiliza una sola vez y es desechado inmediatamente; siendo así que el 79% de los residuos plásticos terminan afectando al medioambiente. Ecuador ha importado un total de 48,473 toneladas de desechos plásticos, entre 2018 y enero de 2022. Durante este lapso, el 2020 fue el año con más importaciones de este tipo 13,151 toneladas, a un costo de más de cinco

millones de dólares.

Por ello, se da la creación de La Ley Orgánica para la Racionalización, Reutilización y Reducción de Plásticos de un Solo Uso del Ecuador es una ley promulgada por el gobierno ecuatoriano en 2020. Esta ley tiene como objetivo reducir la contaminación por plásticos de un solo uso en el país y fomentar la economía circular. Esta prohíbe la importación, comercialización y distribución de plásticos de un solo uso, incluyendo bolsas, sorbetes, cubiertos, vasos y recipientes de poliestireno expandido, entre otros productos. También establece la obligación de los establecimientos comerciales de proporcionar alternativas sostenibles y reutilizables a los clientes. Además, manifiesta la obligación de los productores e importadores de plásticos de un solo uso de implementar planes de gestión de residuos, incluyendo la recolección y reciclaje de sus productos. Las empresas que no cumplan con estas obligaciones pueden ser multadas o incluso perder sus licencias de operación (Landeta, 2020)

2.2.2.3 Vida útil

El poliestireno expandido tiene una vida útil indefinida cuando se almacena correctamente. Sin embargo, si se expone al aire libre, la vida útil se reduce drásticamente, al ser susceptible a la humedad, la luz ultravioleta, los productos químicos y la degradación por los rayos UV, su vida útil puede verse afectada y disminuida. Sin embargo, si se almacena correctamente, el poliestireno expandido puede durar muchos años. Es importante tener en cuenta que la duración de la vida útil del poliestireno expandido puede variar dependiendo de muchos factores, incluyendo la calidad del material, el uso previo y la exposición ambiental. En general, se recomienda reducir el uso de productos elaborados a partir de este material y reciclar o desechar adecuadamente los productos utilizados para minimizar su impacto en el medioambiente (Pardo y León, 2020).

2.2.2.4 Reutilización

El reciclaje consiste en reprocesar los envases de EPS usados en nuevos materiales, para ello el producto ya utilizado deberá ser recogido y transportado a la planta de reciclaje donde se tritura mecánicamente el material, luego se debe mezclarlo con nuevos materiales para formar bloques de EPS que pueden contener hasta un 50% de material reciclado. Una vez realizado aquello, el uso más común que se le da es para rellenar agujeros o bases irregulares en muebles, marcos de ventanas y puertas, en los techos y en los suelos. Además, se utiliza para hacer moldes para fundir metales o resinas (Blanco et al. 2018).

2.2.2.5 Impactos al medio ambiente

El poliestireno expandido tiene un impacto negativo en el medioambiente porque es un material plástico no biodegradable, esto significa que no se descompone con el tiempo, lo que contribuye a la acumulación de basura en la vida silvestre y su hábitat, así como en la calidad del aire, el agua y el suelo. No obstante, la disposición del producto contribuye a la contaminación a partir de una mezcla de combustibles fósiles como el petróleo, el gas y el carbón, lo que genera emisiones de gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global. Estos productos químicos también se liberan al aire durante el proceso de fabricación, lo que afecta la calidad del aire (Arthuz & Pérez, 2019).

Los plásticos tienen un impacto ambiental significativo debido a su producción, uso y eliminación inadecuada. Algunos de los impactos ambientales más comunes incluyen la contaminación de los océanos, los plásticos de un solo uso, como las bolsas, botellas y pajitas, son algunos de los productos más comunes que se encuentran en los océanos, causando la muerte de la vida marina y el desequilibrio del ecosistema. Asimismo, se generan gases de efecto invernadero dado que su producción requiere una gran cantidad de energía y materiales fósiles, lo que resulta en la emisión de gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático. En consecuencia, estas representan una gran cantidad de residuos sólidos urbanos, que pueden tardar cientos de años en degradarse, contaminar el suelo y el agua, y afectar la salud humana y animal. Por otro lado, genera daños a la vida silvestre, los

animales marinos y terrestres pueden confundir los plásticos de un solo uso con alimento y su ingestión puede ser fatal. Los plásticos también pueden atrapar y sofocar a los animales, causando lesiones y muertes (Bollaín & Vicente, 2020).

2.2.3 Degradación microbiana

La degradación microbiana es el proceso mediante el cual los microorganismos descomponen los materiales orgánicos por medio de la fermentación u oxidación. Esto se realiza a través de enzimas producidas por los microorganismos que tienen una gran diversidad catabólica, los cuales son capaces de degradar, transformar, sintetizar y acumular una amplia gama de compuestos, desde ligninas, almidón, celulosa y hemicelulosa hasta hidrocarburos, fármacos y metales. Siendo así, una alternativa ecológica de estos residuos, a diferencia de la incineración (Guerrero & Díaz, 2021).

Este proceso es importante en la naturaleza, ya que permite que los nutrientes orgánicos se reciclen en los ecosistemas y se conviertan en formas que pueden ser utilizadas por otros organismos. También es utilizado en aplicaciones industriales para el tratamiento de aguas residuales y la biodegradación de productos químicos contaminantes. En la degradación microbiana de plásticos, los microorganismos utilizan enzimas para romper los enlaces químicos que mantienen unidas las moléculas de polímero. Esto convierte los polímeros de plástico en fragmentos más pequeños que pueden ser consumidos por los microorganismos y utilizados como fuente de energía o materiales de construcción celular. Por lo que tiene el potencial de ser una alternativa más sostenible a la eliminación de los plásticos en vertederos o en la naturaleza. Sin embargo, actualmente hay varios desafíos asociados con este proceso, incluyendo la dificultad para encontrar microorganismos que puedan degradar eficientemente los diferentes tipos de plásticos, así como el tiempo y las condiciones específicas que se requieren para que ocurra la degradación (Ccallo et al. 2020).

2.2.3.1 Consorcio microbiano

Un consorcio microbiano del EPS es una comunidad microbiana con capacidad para degradar el poliestireno expandido, esta puede ser lograda por varios

microorganismos, incluyendo bacterias, hongos y algas acumuladas para optimizar la degradación del EPS. Estos actúan individualmente en colonias o consorcios microbianos y están íntimamente relacionados con la biodegradación de plásticos sintéticos, naturales y biodegradables. Las enzimas son directa e indirectamente responsables de la oxidación biológica de los plásticos y son secretadas por las células microbianas para catalizar la formación de una o más reacciones en las superficies como oxidación, reducción, hidrólisis y esterificación. Los hongos, enzimas, bacterias y consorcios microbianos para llevar a cabo este proceso son la *Nocardia asteroides*, *Cladosporium cladosporoides*, *Rhodococcus rhodochrous*, *Streptococci sp.*, *Bacillus sp.*, *Pseudomonas sp.*, *Ideonella sakaiensis*, *Pseudomonas aeruginosa*, entre otros (Centeno et al. 2019).

El consorcio microbiano puede desempeñar un papel importante en la reducción del impacto ambiental del plástico de un solo uso mediante la degradación de los plásticos en el medioambiente. Como ya mencionado, esa comunidad de microorganismos trabaja junta para descomponer materiales orgánicos en el medioambiente, incluyendo los plásticos; no obstante, tienen la capacidad de descomponer el poliestireno expandido mediante procesos de digestión anaeróbica y aeróbica. La digestión anaeróbica se refiere a la degradación de los plásticos en un ambiente sin oxígeno, mientras que la digestión aeróbica implica la degradación de los plásticos en presencia de oxígeno. Algunas de las formas en que el consorcio microbiano puede ayudar a reducir el impacto ambiental del plástico de un solo uso incluyen la producción de biodegradables que tienen aplicaciones comerciales y que son más sostenibles que los plásticos de un solo uso. Así como la creación de soluciones de tratamiento de residuos que puede utilizarse para desarrollar soluciones que puedan ser utilizadas por empresas y gobiernos para reducir el impacto ambiental de los plásticos de un solo uso (Ojeda et al. 2021).

2.2.3.2 Usos de microorganismos como aditivo en las producciones de plásticos

Las alternativas ecoamigables son cada vez más importantes para las industrias, de esta forma ayudan a reducir los daños al medio ambiente y a proteger el futuro del planeta, así como mejorar el bienestar humano al promover la salud y el desarrollo sostenible. Por ello, el uso de microorganismos se ha convertido en un aditivo para

la producción de plásticos debido a sus propiedades de biodegradación, mejoramiento de resistencia y facilidad de procesamiento. Dichos microorganismos son utilizados para producir enzimas, alcoholes y otros compuestos químicos (Mazón et al. 2020).

Una de estas alternativas es la producción de polihidroxialcanoatos (PHA) para reemplazar los plásticos derivados del petróleo. Los PHA son compuestos orgánicos que contienen varios grupos hidroxilo o alcohol unidos a una cadena de carbono. Estos compuestos son un componente importante en la composición química de los seres vivos y se encuentran en varios alimentos y plantas. Los PHA se dividen en cinco grupos principales como lo son los monosacáridos, disacáridos, oligosacáridos, polisacáridos y lípidos. Estos se utilizan como fuente de energía, constituyentes estructurales en el tejido vegetal de componentes de la membrana celular y como agentes estabilizadores en alimentos y otras aplicaciones (Guzmán et al. 2017).

2.2.3.3 Beneficios de utilización

Como ya mencionado, la utilidad de los microorganismos como aditivos en la producción de los plásticos son menos costosos que los métodos tradicionales. Esto se debe a que los microorganismos son muy eficientes en la producción de plásticos. En cuanto al medioambiente, algunos plásticos producidos a partir de microorganismos tienen un menor impacto ambiental debido a su bajo contenido de carbono y a la baja toxicidad de los productos químicos involucrados en su producción. De la misma forma, presentan una mayor versatilidad dado que, pueden ser modificados para satisfacer una amplia variedad de necesidades (Huamaní et al. 2020).

2.2.4 Espectroscopia de absorción FTIR

La espectroscopia de absorción es una técnica analítica usada para medir la cantidad de radiación absorbida por una muestra y determinar la concentración de una sustancia química específica en la muestra. Esta técnica se basa en el principio de que una sustancia química absorberá luz de una longitud de onda determinada. La cantidad de luz absorbida por la sustancia entonces se correlaciona con la sustancia que ya se encuentra en la muestra, esta se utiliza para analizar una amplia variedad

de muestras, desde los componentes de la atmósfera hasta compuestos orgánicos en una solución (Llahuilla et al. 2020).

En síntesis, se puede usar para medir la concentración de una sustancia química particular en una muestra, determinar la composición de esta, identificar un compuesto desconocido y caracterizar los efectos químicos o físicos de una sustancia de estudio. La espectroscopia de absorción se puede utilizar para analizar muestras tanto en estado gaseoso como líquido. Los equipos usados suelen ser relativamente caros, pero requieren poca preparación de la muestra (Salome et al. 2020).

2.2.4.1 Fundamento del método

Fourier Transform Infrared (FTIR) es una técnica de análisis espectroscópico que utiliza parte del espectro electromagnético. Concretamente, las longitudes de onda se encuentran entre los 2.500 nanómetros (nm) y los 25.000 nm. La luz emitida por una fuente que produce un espectro completo de longitudes de onda pasa a través de un dispositivo llamado interferómetro. Este modifica la luz de una manera que permite un mayor procesamiento de los datos. El haz de luz atraviesa la muestra y absorbe parte de la energía. Por otro lado, el detector recibe el haz de luz que atraviesa la muestra y lo envía al ordenador. El computador procesa toda la información, deduce la absorción correspondiente a cada longitud de onda y genera un espectro mediante la técnica de la transformación de Fourier (Espinoza et al. 2022).

2.2.4.2. Utilización de FTIR en la degradación por acción demicroorganismos

La FTIR es una herramienta útil para estudiar la degradación de microorganismos, esta técnica de análisis se utiliza para analizar el espectro de absorción de la luz infrarroja emitida por una muestra. Esto permite identificar los grupos funcionales presentes en la muestra y, por lo tanto, determinar cómo se degrada el material. La FTIR se utiliza para estudiar cambios estructurales y dinámicos en materiales biológicos, incluyendo microorganismos, en respuesta a tratamientos químicos o térmicos (Velandia, 2017).

De la misma manera, se utiliza para estudiar los efectos de la exposición a la luz ultravioleta y los cambios en la composición de los metabolitos. El uso de esta se da para determinar la actividad enzimática y la formación de productos de degradación para identificar la presencia de ciertos compuestos, como los ácidos grasos, que se generan durante la degradación microbiana. De tal forma que permite a los investigadores comprender mejor el proceso de degradación de los microorganismos y desarrollar mejores estrategias para su control (Espinoza et al., 2022).

CAPÍTULO III: Diseño metodológico

3. Metodología

La investigación realizada es de tipo investigativo-experimental, en la misma se obtendrán resultados a través de técnicas específicas que permiten observar los cambios estructurales por efecto de la biodegradación en los plásticos de un solo uso; el estudio se desarrolló en el Centro de Investigación Biotecnológica del Ecuador, perteneciente a la Escuela Superior Politécnica del Litoral, ubicada en la ciudad de Guayaquil, específicamente en la Vía Perimetral Km. 30.5, aledaño a la ciudadela "Santa Cecilia".

3.1 Investigaciones preliminares

Se ha tenido en cuenta los resultados hallados en la biodegradación de los plásticos de un solo uso (fragmentos de platos de poliestireno expandido), siendo las investigaciones preliminares que sustentan este estudio, esos ensayos anteriores fueron ejecutados en el Centro de Investigaciones Biotecnológicas. En los mismos se realizaron como evaluaciones: el cambio en la biomasa, microscopía y espectrometría infrarroja antes y después de la colonización de los microorganismos. Los autores concluyeron que se favoreció la biodegradación producto al incremento de la exposición de los microorganismos ante los enlaces simples y los grupos amino de estos plásticos; en ello, se evidenció una mayor en colonización por parte de los microorganismos en las muestras envejecidas y concluyeron que a los 30 días de la colonización, sucedió una reducción mayor al 27% degradándose con mayor facilidad el poliestireno expandido (Diez et al., 2021).

Una vez presentado estos estudios, se ha decidido utilizar el mismo procedimiento en la presente investigación, en la cual se añade durante el periodo de incubación, al consorcio de los microorganismos un consorcio comercial para la biodegradación del poliestireno expandido.

3.2 Diseño del experimento

El experimento se realizó por triplicado, utilizando fiolas de 2000 ml, en las que fueron colocados 500 ml del medio mineral, 10 gr del poliestireno expandido envejecido que ha pasado por un pretratamiento de fotooxidación (exponiéndolo a luz ultravioleta por 200 horas) y el inóculo (consorcio de microorganismos fúngicos más el consorcio biorremediador comercial). Además, se utilizó una fiola como control (medio mineral más el poliestireno expandido envejecido) para las respectivas comparaciones. Las condiciones experimentales se fijaron a temperatura ambiente, pH ajustado a 7 y con agitación (**Anexo I**).

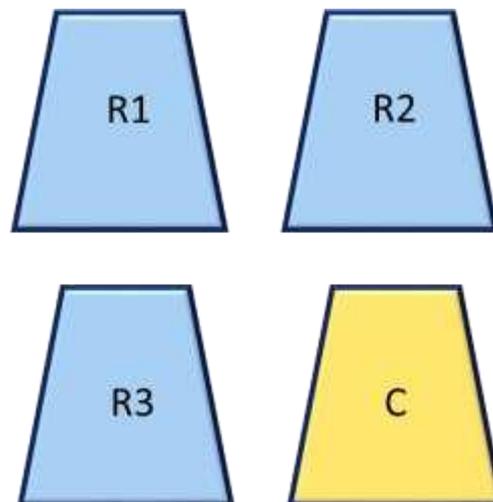


Figura 2: Representación gráfica del diseño de experimentos

Variable Dependiente:

- Degradación del Poliestireno expandido

Variable Independiente:

- Inóculo (consorcio fúngico más consorcio biorremediador comercial)

3.3 Evaluación de la biodegradación

Los cambios ocurridos en el sustrato (poliestireno expandido fotooxidado) fueron evaluados posterior a los 30 días de incubación, donde se determinó la biomasa, se evaluaron los resultados de la microscopía y se interpretaron los espectros IR. Para separar del poliestireno la capa de biomasa generada durante la incubación se realizaron lavados con una solución Tween 20 al 0.05%, dejándose secar en la estufa a 60 grados por 1 hora aproximadamente.

3.3.1 Determinación de la biomasa

Los plásticos fueron extraídos de las fiolas y lavados. Posteriormente se sometieron a un proceso de secado durante 24 horas a una temperatura de 60°C con el objetivo de eliminar la humedad y poder determinar la biomasa por diferencia del peso inicial y el peso final, aplicando para ello la fórmula:

$$\% \text{ pérdida de peso} = \frac{\text{peso inicial} - \text{peso final}}{\text{peso inicial}} * 100$$

Donde:

peso inicial= el peso del plástico antes de ser sometido a la acción de los microorganismos.

peso final= el peso del plástico después de ser sometido a la acción de los microorganismos.

3.3.2 Análisis por microscopía

Con el objetivo de determinar la capacidad microbiana para la degradación del plástico y la preferencia por dicho sustrato se realizaron observaciones en el estereoscopio Zeiss Lumar v12, específicamente a tiempo cero, es decir, en los plásticos no teñidos para tener una imagen general del plástico, mientras que el microscopio Zeiss axioscop 2 Plus se utilizó para la observación al cabo de 30 días para observar el avance de la colonización (Figura 3 y 4), para lo cual se tomaron

similares fragmentos de plástico, lavados y secos, se tiñeron de azul (Lactofenol) y se llevaron al microscopio para observar crecimiento y desarrollo microbiano.



Figura 3: Estereoscopio Zeiss
Lumar v12



Figura 4: Microscopio Zeiss
axioscop 2 Plus

3.3.3 Espectrometría infrarroja (FTIR)

Para determinar los parámetros relacionados con la composición y la estructura química del poliestireno se empleó la espectrometría infrarroja, la que permitió a diferentes longitudes de onda la compilación de los espectros infrarrojos relacionados con la estructura del sustrato (Mata-Miranda et al., 2017).

Para la determinación de los espectros se realizó el mismo procedimiento usado en la biomasa y luego se llevaron los fragmentos de poliestireno fotooxidado al equipo para caracterizar por espectroscopia infrarroja los cambios producidos en los mismos a partir de las bandas vibracionales de los grupos funcionales.

3.4 Análisis estadístico

Los resultados obtenidos a partir de los experimentos de biomasa (tipo cuantitativo) y espectroscopía IR (del tipo cualitativo), fueron procesados con el programa SPSS Versión 17 y sometidos a un análisis estadístico descriptivo para determinar la capacidad de biodegradación del inóculo seleccionado en los fragmentos de poliestireno expandido fotooxidado.

CAPÍTULO IV: Análisis e interpretación de resultados

Los resultados obtenidos y los cambios observados al cabo de los treinta (30) días de incubación, así como, la determinación de todos los parámetros se muestra a continuación.

4.1 Determinación de la biomasa

El promedio de los porcentajes de degradación calculados se muestra en la siguiente tabla, apareciendo el análisis descriptivo de la biomasa realizado para las tres réplicas; como se aprecia en la misma, se alcanzaron como promedios 0.01489 (réplica 1), 0.01206 (réplica 2) y 0.01515 (réplica 3); el valor mínimo encontrado se observó en la segunda réplica con 0.0013 y el mayor en la réplica 1 con 0.0183.

Tabla 1: Análisis descriptivo de la biomasa.

	N	Media	Desviación estándar	Error estándar	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo	
					Límite inferior	Límite superior			
Fiola1	,0010	1	,013100	.	.	.	.	,0131	,0131
	,0012	1	,013200	.	.	.	.	,0132	,0132
	,0013	6	,014967	,0011003	,0004492	,013812	,016121	,0132	,0166
	,0014	1	,014500	.	.	.	.	,0145	,0145
	,0015	1	,018300	.	.	.	.	,0183	,0183
	Total	10	,014890	,0016306	,0005156	,013724	,016056	,0131	,0183
Fiola2	,0010	1	,013000	.	.	.	.	,0130	,0130
	,0012	1	,015100	.	.	.	.	,0151	,0151
	,0013	6	,010950	,0051601	,0021066	,005535	,016365	,0013	,0160
	,0014	1	,013400	.	.	.	.	,0134	,0134
	,0015	1	,013400	.	.	.	.	,0134	,0134
	Total	10	,012060	,0041398	,0013091	,009099	,015021	,0013	,0160
Fiola3	,0010	1	,016800	.	.	.	.	,0168	,0168
	,0012	1	,014900	.	.	.	.	,0149	,0149
	,0013	6	,015633	,0010948	,0004470	,014484	,016782	,0147	,0177
	,0014	1	,012100	.	.	.	.	,0121	,0121
	,0015	1	,013900	.	.	.	.	,0139	,0139
	Total	10	,015150	,0015292	,0004836	,014056	,016244	,0121	,0177

Al decir de Chauhan et al. (2028), la producción de biomasa creada por los microorganismos les favorece al protegerlos de las condiciones desfavorables del medio para su propio desarrollo. Por tanto, según Gutiérrez (2022) existen estudios que han demostrado la importancia y como ocurre el proceso de degradación, iniciando con la fijación al sustrato, específicamente en la capa superficial del mismo para posteriormente llegar a las capas más internas y comenzar la degradación (Gutiérrez y García, 2022).

En la tabla 2 se muestran los resultados del análisis de varianza de las réplicas de la biomasa del experimento, no se aprecian diferencias estadísticas significativas entre las réplicas en estudio.

Tabla 2: Análisis de varianza de las réplicas de la biomasa del experimento

			Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Fiola1	Entre grupos	(Combinado)	,000	4	,000	3,691	,092
		Término Ponderados	,000	1	,000	10,088	,025
		lineal Desviación	,000	3	,000	1,559	,309
	Dentro de grupos		,000	5	,000		
	Total		,000	9			
Fiola2	Entre grupos	(Combinado)	,000	4	,000	,198	,929
		Término Ponderados	,000	1	,000	,009	,930
		lineal Desviación	,000	3	,000	,261	,851
	Dentro de grupos		,000	5	,000		
	Total		,000	9			
Fiola3	Entre grupos	(Combinado)	,000	4	,000	3,139	,121
		Término Ponderados	,000	1	,000	5,883	,060
		lineal Desviación	,000	3	,000	2,225	,203
	Dentro de grupos		,000	5	,000		
	Total		,000	9			

Como resultado del análisis descriptivo realizado a las réplicas al cumplir los 30 días, se demuestra en la tabla 3 Análisis descriptivo a los 30 días, el mayor promedio observado en la misma fue el de la réplica 3 con 0.0163, seguido de la réplica 1 con 0.0144 y la réplica 2 con 0.0134 respectivamente. En ellos pudo haber incidido el tamaño de corte de la materia prima utilizada en el estudio, ya que, la falta de homogeneidad en el tamaño de la misma conlleva a diferencias en el peso final.

Tabla 3: Análisis descriptivo a los 30 días

	N	Media	Desviación estándar	Error estándar	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo	
					Límite inferior	Límite superior			
Fiola1	,0010	1	,013100	.	.	.	.	,0131	,0131
	,0012	1	,013200	.	.	.	.	,0132	,0132
	,0013	2	,015750	,0012021	,0008500	,004950	,026550	,0149	,0166
	Total	4	,014450	,0016543	,0008271	,011818	,017082	,0131	,0166
Fiola2	,0010	1	,013000	.	.	.	.	,0130	,0130
	,0012	1	,015100	.	.	.	.	,0151	,0151
	,0013	2	,012800	,0045255	,0032000	-	,053460	,0096	,0160
	Total	4	,013425	,0028430	,0014215	,008901	,017949	,0096	,0160
Fiola3	,0010	1	,016800	.	.	.	.	,0168	,0168
	,0012	1	,014900	.	.	.	.	,0149	,0149
	,0013	2	,016750	,0013435	,0009500	,004679	,028821	,0158	,0177
	Total	4	,016300	,0012138	,0006069	,014369	,018231	,0149	,0177

A los 30 días se realizaron las mediciones del peso de los plásticos, en el análisis de varianza que muestra la tabla 4, aparecen los resultados estadísticos de esta etapa. Aquí no aparecen diferencias significativas entre las réplicas.

Tabla 4: Análisis de varianza de las réplicas de la biomasa a los 30 días del experimento

			ANOVA					
			Suma de		Media			
			cuadrados	gl	cuadrática	F	Sig.	
Fiola1	Entre	(Combinado)	,000	2	,000	2,341	,420	
	grupos	Término	Ponderados	,000	1	,000	3,240	,323
		lineal	Desviación	,000	1	,000	1,442	,442
	Dentro de grupos			,000	1	,000		
	Total			,000	3			
Fiola2	Entre	(Combinado)	,000	2	,000	,092	,919	
	grupos	Término	Ponderados	,000	1	,000	,001	,977
		lineal	Desviación	,000	1	,000	,183	,743
	Dentro de grupos			,000	1	,000		
	Total			,000	3			
Fiola3	Entre	(Combinado)	,000	2	,000	,724	,639	
	grupos	Término	Ponderados	,000	1	,000	,001	,981
		lineal	Desviación	,000	1	,000	1,448	,441
	Dentro de grupos			,000	1	,000		
	Total			,000	3			

Por su parte la figura 5 peso inicial y final por réplicas, se observa como mayor valor inicial el de la réplica 3 (0.0151) lo que significa que inicialmente los plásticos no estaban cortados del mismo tamaño y este elemento puede influir en el peso del mismo, de igual forma ha sido significativo el valor final, aunque al realizar el análisis estadístico no mostraron diferencias significativas entre ellos. Si se declara que en la réplica 2 se observaron las mayores diferencias entre el peso inicial (0.0132) y el peso final (0.016).

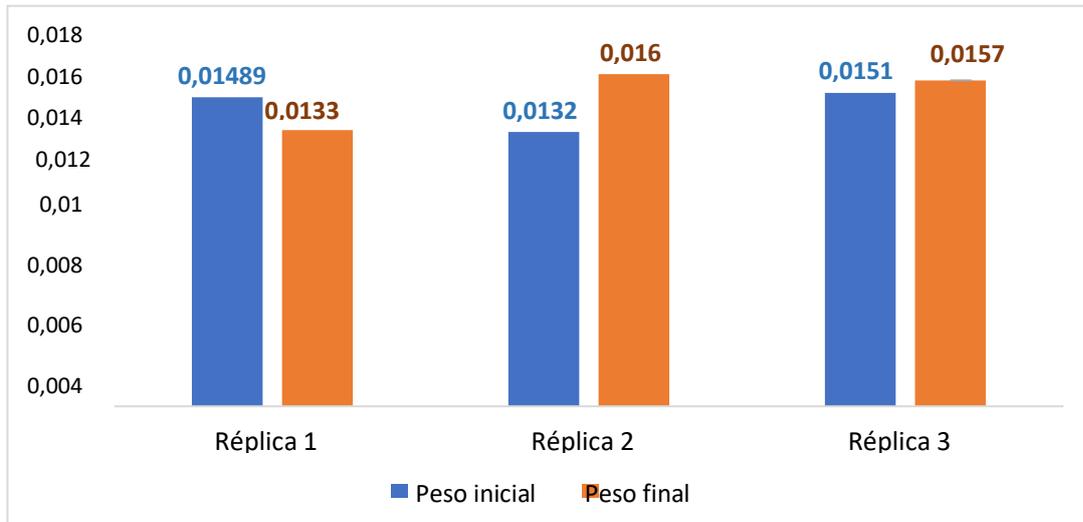


Figura 5: Valores del peso inicial y final por réplicas

Al observar la figura 6 Diferencia entre el peso inicial y final de la biomasa, aparecen valores de las réplicas, la primera con un valor positivo, las dos de ellos dos resultados son negativos (Réplica 2 y 3) y se debe fundamentalmente a la fragmentación del microplástico, el cual está constituido en capas, que irán siendo colonizadas por este consorcio microbiano, por ello, los valores negativos observados se corresponden con el incremento de la colonización de los microbiana sobre el plástico y por ello se pierde peso.

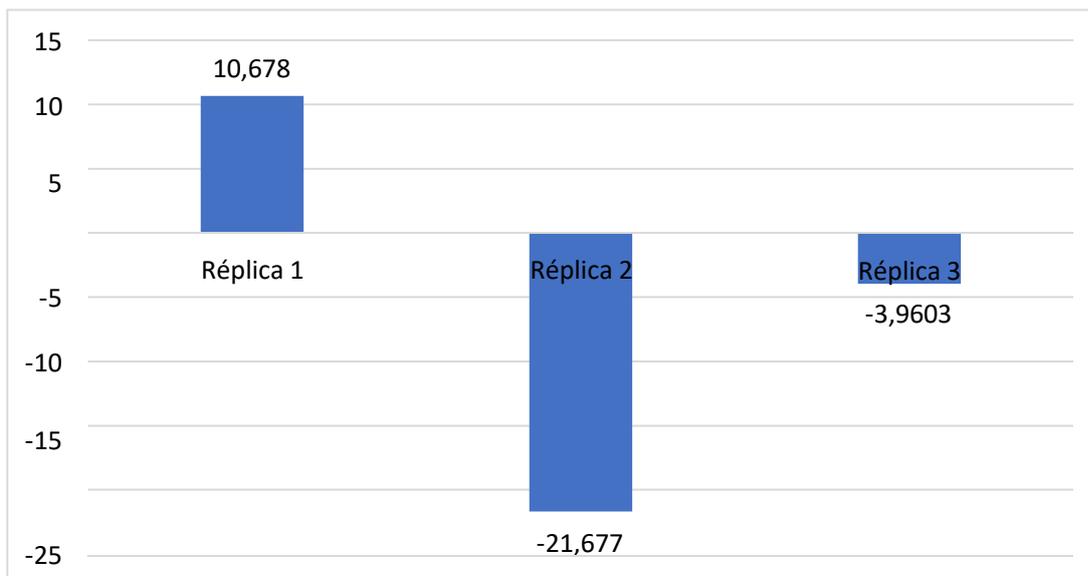


Figura 6: Diferencia entre el peso inicial y final de la biomasa

adecuada colonización de los microorganismos, lo cual trae como consecuencia la degradación posterior, aspecto que es apreciado en los cambios estructurales del sustrato, siendo este proceso considerado efectivo como pretratamiento del plástico.

4.3 Análisis de la Espectrometría infrarroja (FTIR).

4.3.1 Análisis del espectro del Poliestireno Expandido

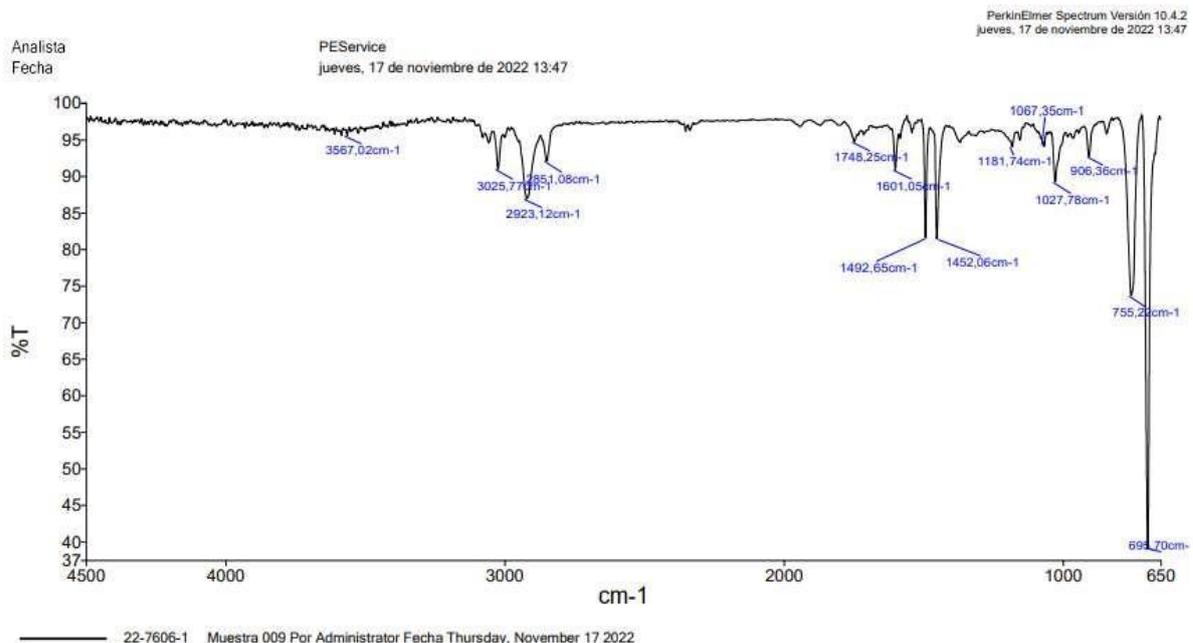


Figura 8: Representación del Espectro IR del Poliestireno Expandido

El espectro 22-7606-1 corresponde al poliestireno expandido en el cual se puede observar vibración en el valor de $3567,02\text{cm}^{-1}$ lo que corresponde a grupo hidroxilo o amino, esta señal prácticamente no se define, por lo que puede ser ruido, se observa un pico en $3025,77\text{cm}^{-1}$, correspondiente a Carbono sp^2 enlazado al Hidrógeno, adicional se define vibración en $2923,12\text{cm}^{-1}$ perteneciente a estiramiento asimétrico de metileno y en $2851,08\text{cm}^{-1}$ que corresponde a estiramiento simétrico de metileno, en $1748,25\text{cm}^{-1}$ se observa una banda que está en la región de los carbonilos pero es muy poco intensa, por lo que pueden ser armónicos y bandas de combinación en la zona $2000-1670\text{cm}^{-1}$, también existen vibraciones en $1601,05\text{cm}^{-1}$, $1492,65\text{cm}^{-1}$, $1452,06\text{cm}^{-1}$, que suelen aparecer en anillos bencénicos y las tres pertenecen a un patrón de monosustitución.

Se observan cuatro bandas en los valores de $1181,74\text{cm}^{-1}$, $1067,35\text{cm}^{-1}$, $1027,78\text{cm}^{-1}$ y $906,36\text{cm}^{-1}$, estas también pueden aparecer en estos sistemas y no corresponden a otros grupos funcionales. Por último, existen dos señales en $755,22\text{cm}^{-1}$ y $695,70\text{cm}^{-1}$ típicas de bencenos monosustituídos.

Los resultados obtenidos en nuestros experimentos coinciden con lo reportado por Velandia (2017), al decir de la existencia de tres grupos de bandas relacionadas con los movimientos de los enlaces C-H, enlace C-C del anillo aromático y los movimientos de flexión de $-\text{CH}_2$ y tensiones del anillo aromático (Velandia, 2017).

4.3.2 Análisis del espectro del Poliestireno Expandido Fotooxidado

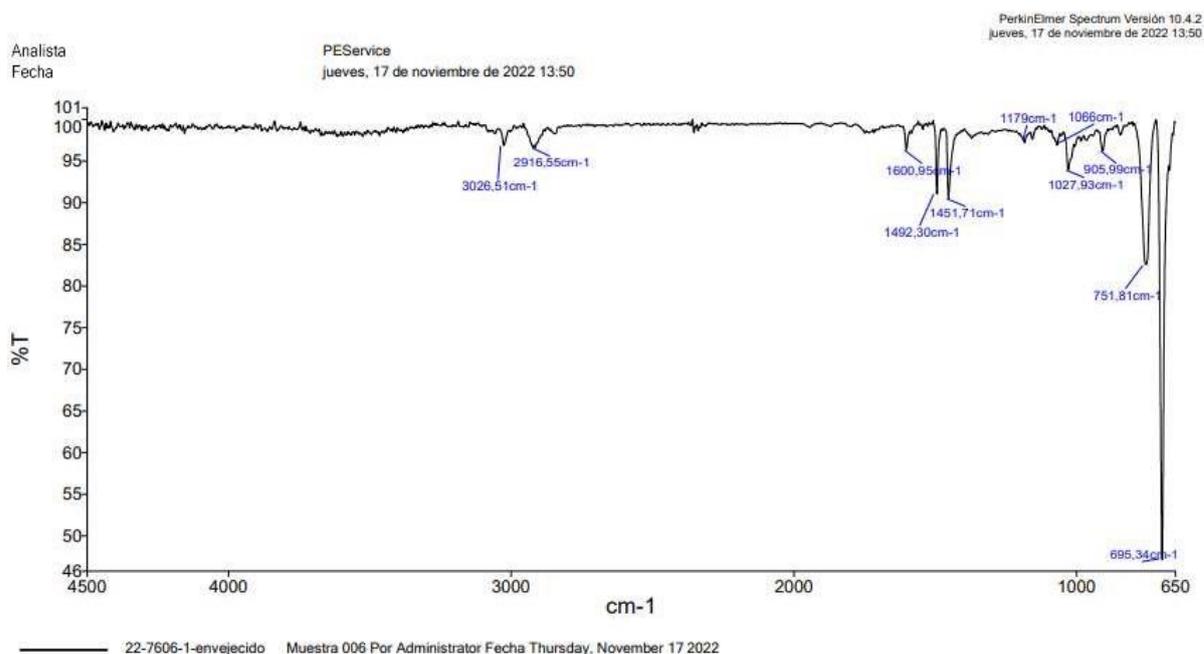


Figura 9: Representación del Espectro IR del Poliestireno Envejecido

El espectro 22-7606 – envejecido, corresponde al poliestireno expandido envejecido, el cual no presenta vibraciones diferentes al espectro del poliestireno expandido que se muestra anteriormente (Figura 9). Las señales son prácticamente las mismas, las variaciones en los valores son muy poco significativas, por lo que se puede plantear que el proceso de fotooxidación es adecuado y serviría como

pretratamiento para con posterioridad añadir los microorganismos que potencialmente tienen la capacidad de degradación del sustrato.

Tanto en el caso del poliestireno expandido, como en el caso del pretratado (fotooxidado) al observar los espectros se puede plantear que no existe producción de oxígeno, sólo estructuras carbonadas como alcanos y alquenos, aspectos importantes para la comparación e interpretación luego de la adición del inóculo (consorcio fúngico y consorcio biorremediador comercial).

4.3.3 Análisis del espectro sobrepuesto

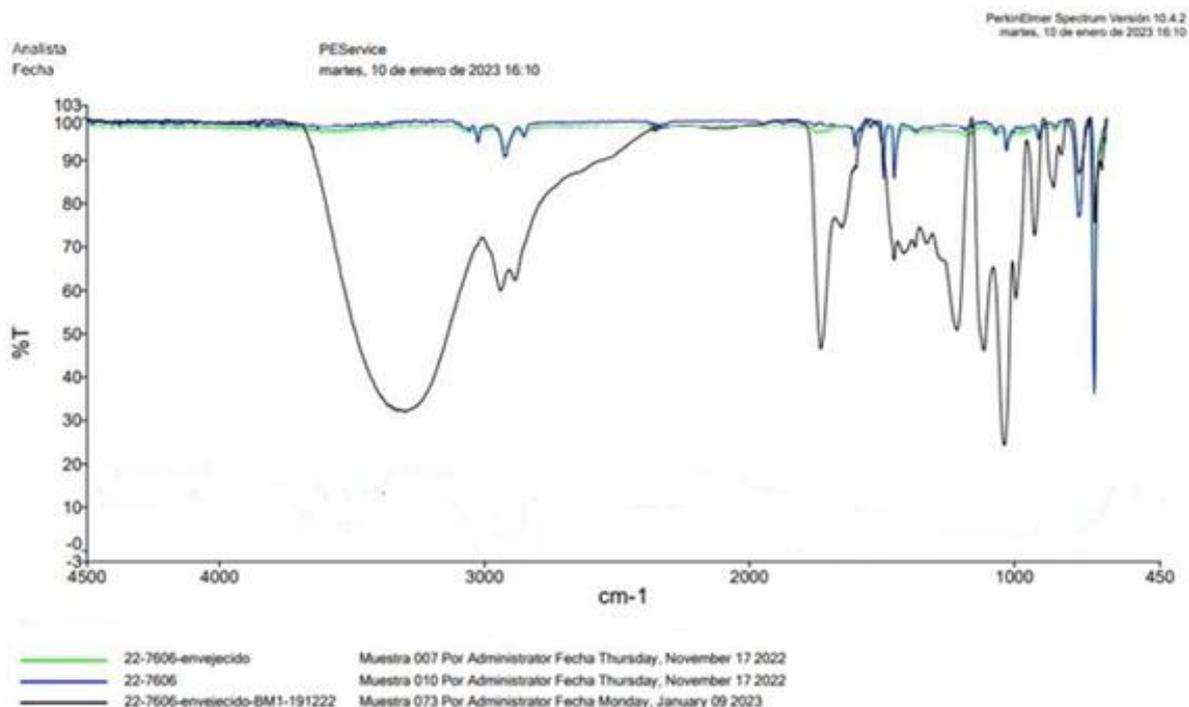


Figura 10: *Representación del Espectro Sobrepuesto*

Los espectros azul y verde corresponden al poliestireno expandido y al poliestireno expandido envejecido, respectivamente, que fueron analizados anteriormente. Como puede observarse ambos espectros se superponen por lo que esto es indicativo de la similitud en el comportamiento de ambos. Esto corrobora, lo planteado anteriormente en las imágenes al microscopio, al decir, que el proceso de fotooxidación únicamente serviría como pretratamiento del sustrato.

El espectro de color negro (22-7606 – envejecido – BM1- 191222) corresponde al poliestireno expandido envejecido 30 días después de ser añadidos los microorganismos, en él se define claramente una señal intensa que corresponde a la vibración hidroxilo (ν_{OH}) que su valor se encuentra aproximadamente a 3300 cm^{-1} , por lo que se puede decir que hay la presencia del grupo hidroxilo, aparece además una señal desdoblada ν_{C-H} que se debe al estiramiento asimétrico de metileno, que suelen aparecer siempre que se tienen Carbono sp^3 y sp^2 coincidiendo enlazados a Hidrógeno por encima y por debajo de los 3000 cm^{-1} , refiriéndonos aquí a la señal del metileno, es decir de un Carbono sp^3 en este caso enlazado a Hidrógeno. Cerca de los 1700 cm^{-1} se observa una señal intensa en la región carbonílica, vibración de valencia del grupo carbonilo $\nu_{C=O}$. En este espectro ocurre la aparición del Oxígeno, que se debe a procesos oxidativos que se realizan a partir de los procesos microbianos y las propias transformaciones realizadas por el inóculo en contacto con el sustrato, para transformar el poliestireno expandido, hasta degradarlo.

CAPÍTULO V: Conclusiones y Recomendaciones

La utilización de gran variedad de plásticos a nivel industrial y doméstico, unido a la falta de políticas adecuadas, la escasez de recursos para la implementación de sistemas de reciclaje y la pobre educación ambiental, entre otros factores, ha traído como consecuencia la acumulación de grandes cantidades de desechos y por consecuencia la afectación general al ecosistema, aspectos que ponen en riesgo la calidad de vida de todas las especies.

El problema es grave y contribuir al mejoramiento, desde donde nos toca, siendo el ámbito investigativo una arista que se debe explotar a fin de encontrar soluciones que permitan el mejor manejo de los desechos plásticos, entre las cuales se puede mencionar el uso de consorcios microbianos con capacidad para degradarlo.

5.1 Conclusiones

- Las condiciones seleccionadas para el tratamiento del plástico de un solo uso a partir de la exposición a un consorcio microbiano de 4 cepas de hongos y un consorcio biorremediador comercial, mostraron buenos resultados en cuanto a la degradación del sustrato, siendo el proceso previo de fotooxidación generador de una mejor degradación del material.
- Los resultados de los espectros IR para el plástico normal y el fotooxidado fueron similares, lo cual indica que la fotooxidación es útil como método de pretratamiento.
- El espectro sobrepuesto demostró la capacidad de los microorganismos utilizados en la transformación del poliestireno y su degradación a partir de la aparición del Oxígeno debido a procesos oxidativos.

5.2 Recomendaciones

- Extender la evaluación en márgenes de 6 meses, por dos años consecutivos, los cambios causados en el ESP y el efecto del tratamiento microbiano para su degradación.
- Continuar evaluando otras alternativas microbianas con potencial utilidad en la degradación de los plásticos de un solo uso, acorde a los interesantes resultados de las investigaciones realizadas hasta la actualidad.

Referencias bibliográficas

- Álvarez, S., Cuarán, M., Izquierdo, A., y Yancho, M. (2021). Estrategia educativa para cuidado del medioambiente disminuyendo los productos de un solo uso. *Revista Conrado*, 17(S3), Art. S3
- Arthuz, L., y Pérez, W. (2019). Alternativas de bajo impacto ambiental para el reciclaje del poliestireno expandido a nivel mundial. *Informador Técnico*, 83(2), Art. 2. <https://doi.org/10.23850/22565035.1638>
- Arzube Calderón, F. A. (2021). Análisis a la Ley de Plásticos de un solo uso (Ley Orgánica para la Recircularización, Reutilización, y Reducción de Plásticos de un solo Uso) y propuestas para su Efectividad Jurídica (Bachelor's thesis, Universidad de Guayaquil, Facultad de Jurisprudencia Ciencias Sociales y Políticas)
- Barrera, G., Ocampo, L., y Olaya, J. (2017). Producción y caracterización de las propiedades mecánicas y térmicas de poliestireno expandido con material reciclado. *Revista Ingeniería y Universidad*, 21(2), 177-195
- Billmeyer, F. (2020). *Ciencia de los polímeros*. Reverte. <https://books.google.com.ec/books?id=Fe0FEAAAQBAJ&lpg=PR5&ots=e3y0p0gfiO&dq=origen%20de%20los%20polimeros&lr&hl=es&pg=PR5#v=onepage&q=origen%20de%20los%20polimeros&f=false>
- Blanco, A., García, R., Serrano, P., y Hernández, G. (2018). Estudio de la citotoxicidad de películas nanohíbridas con matriz de poliestireno reciclado. *Mundo nano Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 11(21), 61-71. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2018.21.62567>
- Borda, B., Lahura, N., y Iannacone, J. (2020). Diagnóstico sobre el consumo de bolsas de plástico de un solo uso y su impacto negativo en el ambiente. *Cátedra Villarreal*, 8(2), Art. 2. <https://doi.org/10.24039/cv202082962>.

- Bollaín, C., y Vicente, D. (2020). Presencia de microplásticos en aguas y su potencial impacto en la salud pública. *Revista Española de Salud Pública*, 93, e201908064
- Calderón Muñoz, A. C. (2020). Consecuencias de la contaminación marítima; sobre los desechos plásticos de un solo uso en el cantón Playas de Villamil, en los últimos 10 años (Master's thesis, Universidad de Guayaquil: Instituto Superior Postgrado
- Ccallo, M., Sacaca, F., Callata, R., Vigo, J., & Calla, J. (2020). Biodegradación de polímeros de plástico por *Pseudomonas*. *Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 6(2), Art. 2. <https://doi.org/10.17162/rictd.v6i2.1457>
- Centeno, L., Quintana, A., y López, F. (2019). Efecto de un consorcio microbiano en la eficacia del tratamiento de aguas residuales, Trujillo, Perú. *Arnaldoa*, 26(1), 433-446. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.261.26123>
- Chávez, J., Fernández, R., Bravo, C., Intriago, M., Bello, I., Mendoza, E., y Cesar, L. (2022). Evaluación de poliestireno expandido (EPS) y polietileno de baja densidad (PEBD) como alimento para larvas de gorgojo negro (*Tenebrio molitor*). *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(4), Art. 4. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i4.2762
- Cornejo, C. (2020). Reducción de los desechos plásticos en Chile: Elementos para profundizar nuestra regulación. *Revista de Derecho Ambiental*, 14, Art. 14. <https://doi.org/10.5354/0719-4633.2020.54188>
- De Simone, M. (2020). La Directiva sobre el plástico de un solo uso. *Revista Aranzadi de Derecho Ambiental*, 46, 1-12
- Espinoza, E., De la O, E., Esparza, E., Ayala, J., y Gallegos, P. (2022). Espectroscopia de absorción en el infrarrojo cercano para la caracterización del extracto etanólico *Cymbopogon citratus*. *Biotecnología y Sustentabilidad*, 7(1), Art. 1. <https://doi.org/10.57737/biotecnologiaysust.v7i1.1654>

- Fischbach, S. y Yauney, B. (2023). Teoría cognitiva social y relación recíproca: una guía para la educación sobre plásticos de un solo uso para formuladores de políticas, líderes empresariales y consumidores, *Sostenibilidad*, 15(5), 3946. <https://doi.org/10.3390/su15053946>
- Franco Oliva, K. M., y Navarro Sarmiento, J. P. (2020). Percepción ciudadana sobre la ley que regula la entrega de bolsas de plástico de un solo uso en los establecimientos comerciales de Lima, 2019
- Guerrero, M., y Díaz, J. (2021). Degradación microbiana de residuos de plaguicidas en dispositivos de biorremediación de tipo cama biológica. *Revista Torreón Universitario*, 10(29), Art. 29. <https://doi.org/10.5377/rtu.v10i29.12741>
- Gutiérrez Cevallos, G. F., y García, D. (2022). *Comparación de la capacidad de biodegradación de plásticos de un solo uso por microorganismos aislados versus consorcios microbianos* (Doctoral dissertation, ESPOL. FCV)
- Guzmán, C., Hurtado, A., Carreño, C., y Casos, I. (2017). Producción de polihidroxialcanoatos por bacterias halófilas nativas utilizando almidón de cáscaras de *Solanum tuberosum* L. *Scientia Agropecuaria*, 8(2), 109-118. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2017.02.03>
- Huamaní, C., Tudela, J., y Huamaní, A. (2020). Gestión de residuos sólidos de la ciudad de Juliaca—Puno—Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 22(1), 106-115. <https://doi.org/10.18271/ria.2020.541>
- Landeta, D. (2020). *La ley que regula el uso de plásticos en el Ecuador ya está en el Registro Oficial. El Comercio.* <https://www.elcomercio.com/tendencias/ambiente/ley-plasticos-ecuador-registro-oficial.html>
- Lindwall, C. (2020). *Plásticos de un solo uso 101*. La Onda Verde | NRDC. <https://www.nrdc.org/es/stories/plasticos-solo-uso-101>

- Llahuilla, J., Laguna, L., y Ricaldi, E. (2020). Determinación de arsénico y plomo en lápices labiales mediante espectroscopia de absorción atómica que se expende en Lima Metropolitana. *Ciencia e Investigación*, 23(2), Art. 2. <https://doi.org/10.15381/ci.v23i2.19379>
- Mazón, J., Ojeda, C., García, M., Batista, D., y Abasolo, F. (2020). La Homeopatía incrementa la tolerancia al estrés por NaCl en plantas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) variedad Quivicán. *Terra Latinoamericana*, 38(1), 149-163. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i1.584>
- Miranda, D. (2020, marzo 20). *20 datos sobre el problema del plástico en el mundo*. www.nationalgeographic.com.es.
https://www.nationalgeographic.com.es/mundo-ng/20-datos-sobre-problema-plastico-mundo_15282
- Murray, G., Serrano, M., y Miranda, M. (2021). Una inundación global de plásticos. *RDU UNAM*, 22(4), 1-12
- Ojeda, L., Ronzella, J., y Zambrano, M. (2021). Plásticos no ambiente marinho frio: Uma revisão sobre o potencial de biodegradação microbiana. *Research, Society and Development*, 10(3), Art. 3. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i3.13642>
- Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (2022, marzo 2). *El mundo se une contra el plástico*. Noticias ONU. <https://news.un.org/es/story/2022/03/1504922>
- Pardo, I., y León, J. (2020). Diseño de una alternativa verde para el aprovechamiento de residuos de poliestireno expandido. *Investigación Formativa en Ingeniería*, 2020, ISBN 9789585233355, págs. 44-51, 44-51
- Puchol, T. (2021). El futuro impuesto sobre plásticos no reutilizables. *Quincena fiscal*, 4, 71-103

- Rasmussen, S. (2021). From Parkesine to Celluloid: The Birth of Organic Plastics. *Angewandte Chemie*, 133(15), 8090-8094. <https://doi.org/10.1002/ange.202015095>
- Rhodes, C. J. (2018). Plastic pollution and potential solutions. *Science progress*, 101(3), 207-260. <https://doi.org/10.3184/003685018X15294876706211>
- Rogontino, F., López, J., Martínez, E., y Scola, S. (2017). Evaluación del poliestireno expandido con mortero de cemento expuesto al fuego. *Revista INGENIERÍA UC*, 24(1), 22-27
- Rojo, E., y Montoto, T. (2017). Basuras marinas, plásticos y microplásticos: *Orígenes, impactos y consecuencias de una amenaza global*. *Ecologistas en Acción*. <https://accedacris.ulpgc.es/jspui/handle/10553/56275>
- Salome, L., Tapia, W., y Villamarín, A. (2020). Verificación del método analítico de espectroscopía de absorción atómica con horno de grafito para la cuantificación de cadmio en almendra de cacao (*Theobroma cacao*). *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 31(1), 56-60. <https://doi.org/10.17163/lgr.n31.2020.04>
- Sánchez, P., Bustos, E., y Reyes, J. (2021). La educación ambiental: Problemática de los plásticos de un solo uso en las instituciones educativas. *Revista Boletín Redipe*, 10(4), Art. 4. <https://doi.org/10.36260/rbr.v10i4.1253>
- Statista Research Department. (2022). Plástico: *Producción mundial 1950-2020*.
- Statista. <https://es.statista.com/estadisticas/636183/produccion-mundial-de-plastico/>
- The ocean cleanup. The ocean cleanup y las naciones unidas: asociación con el PNUD. 9 febrero 2023
- Valdivia Candia, C. F. (2022). Generación y caracterización de un consorcio

bacteriano aerobio que degraden polietileno y polipropileno como alternativa de manejo en la CDMX. <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/31068>

Velandia, J. (2017). Identificación de polímeros por espectroscopía infrarroja. *Revista Ontare*, 5, 26. <https://doi.org/10.21158/23823399.v5.n0.2017.2005>

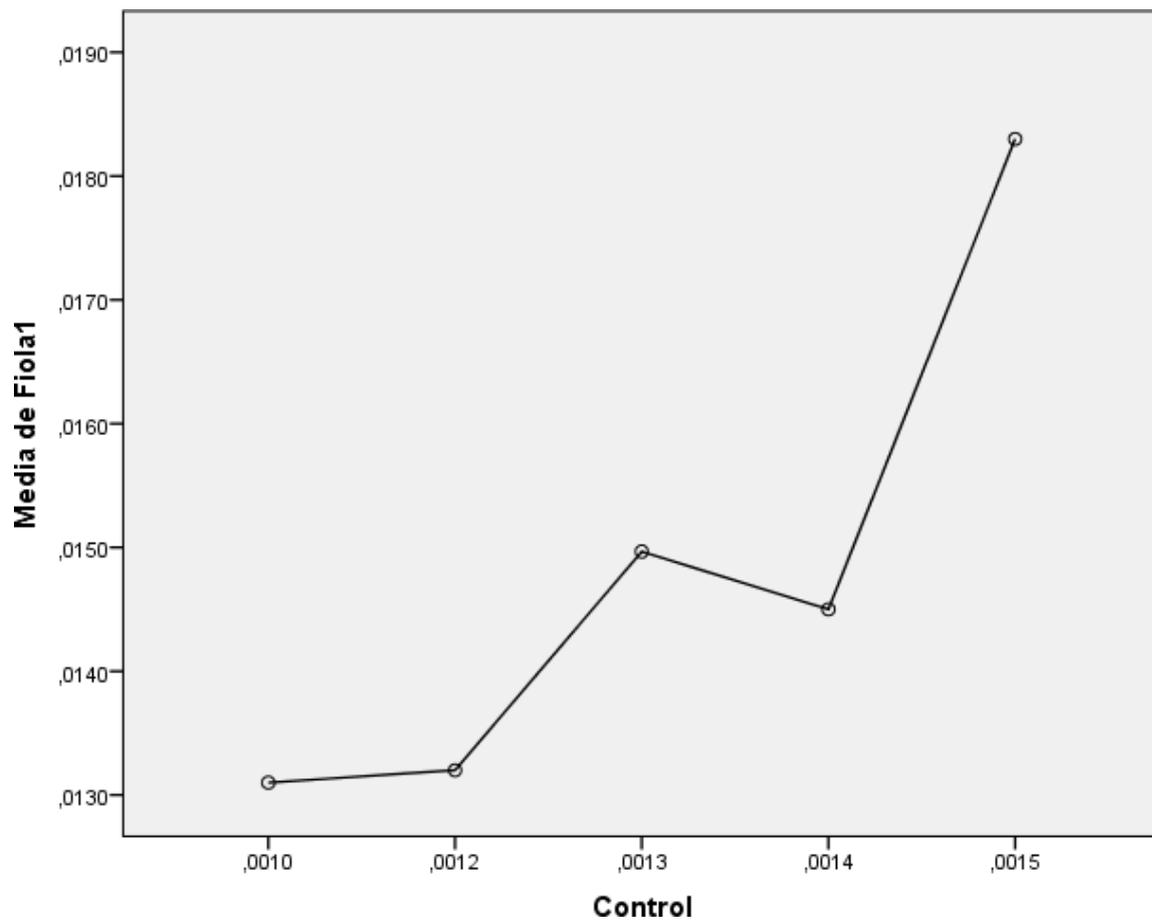
WWF. (2019). Los plásticos. 30 de mayo 2019. <https://www.worldwildlife.org/descubre-wwf/historias/los-plasticos>

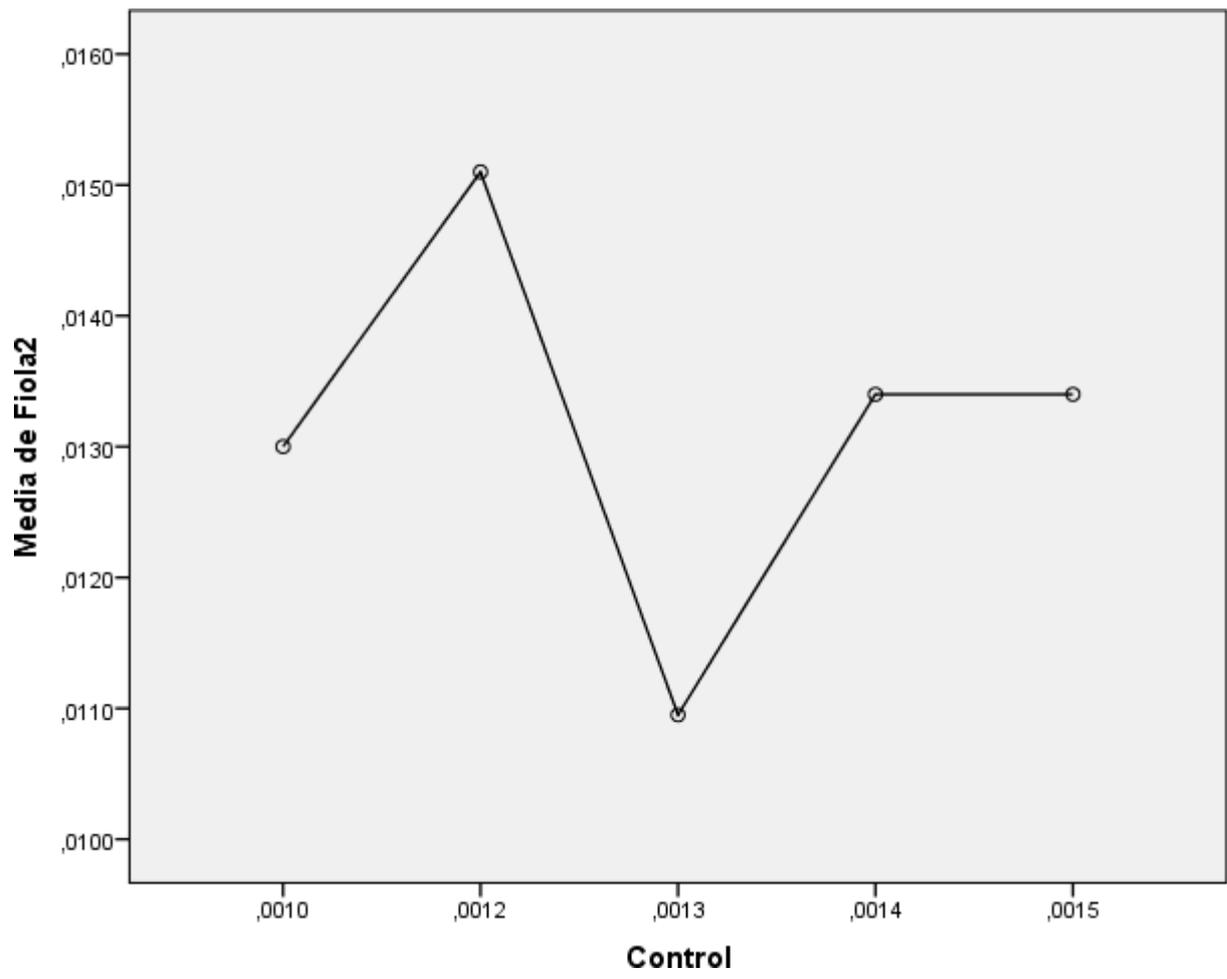
Anexos

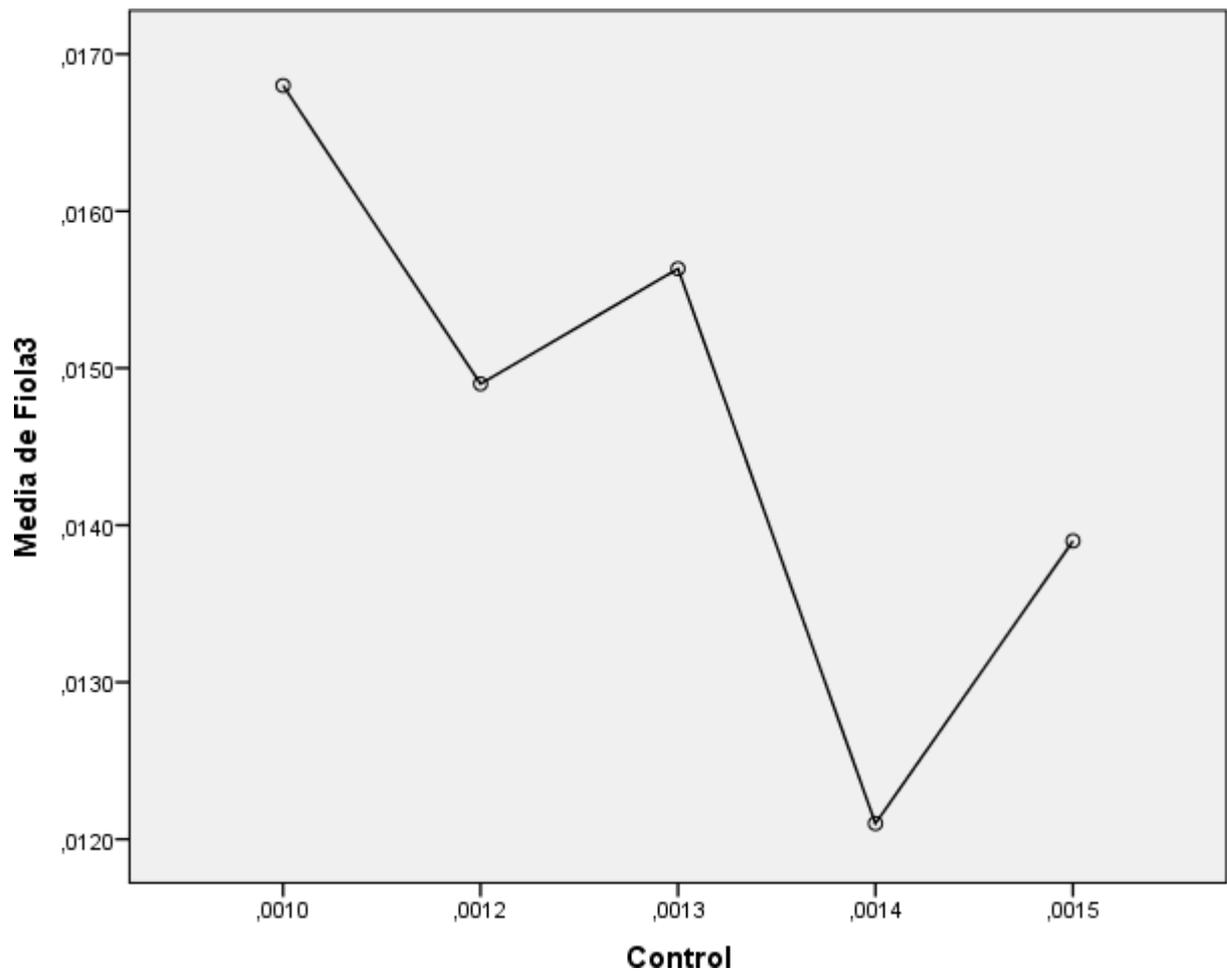
Anexo I: Diseño del experimento



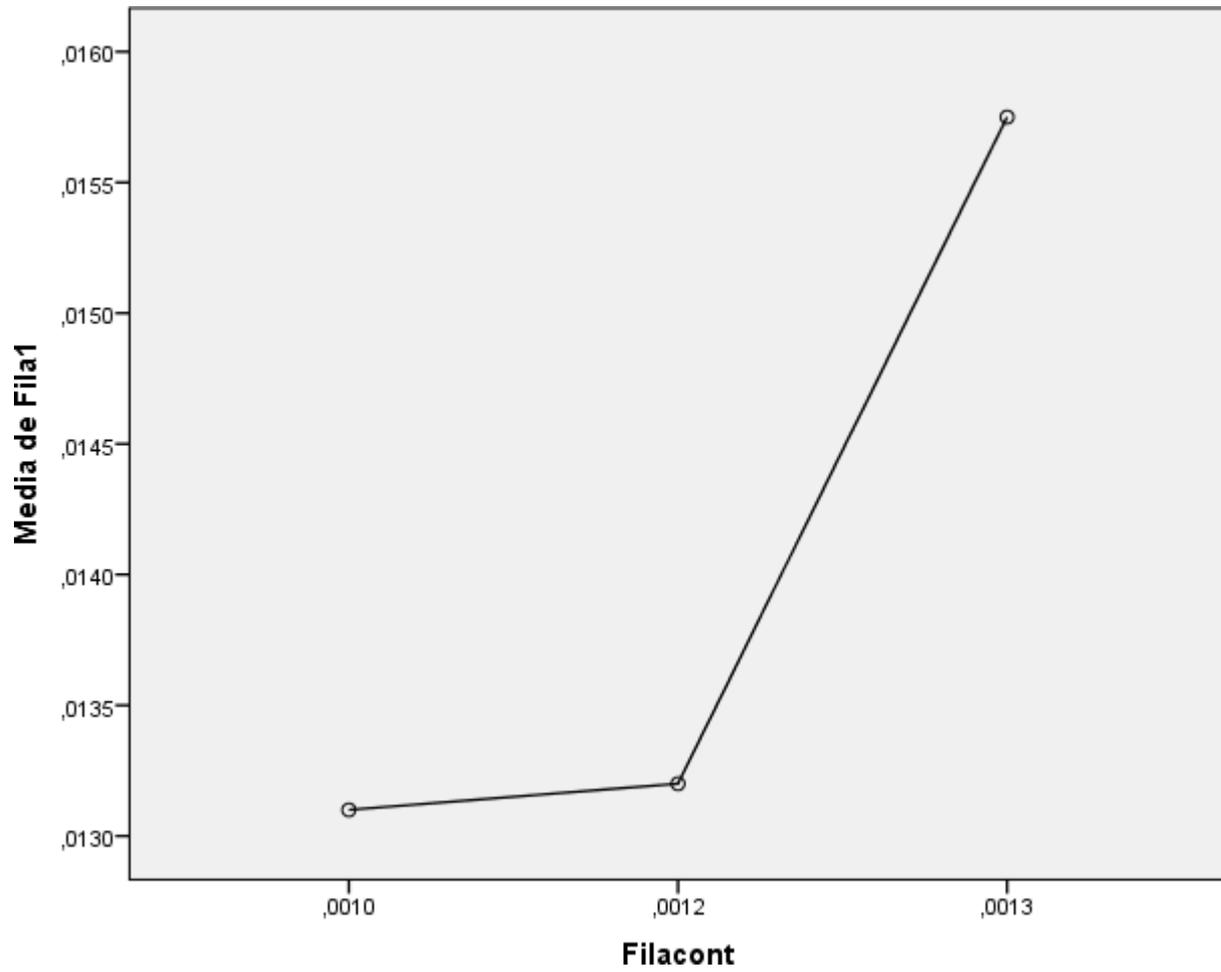
Anexo II: Gráficos de promedio del peso de la biomasa al inicio del experimento

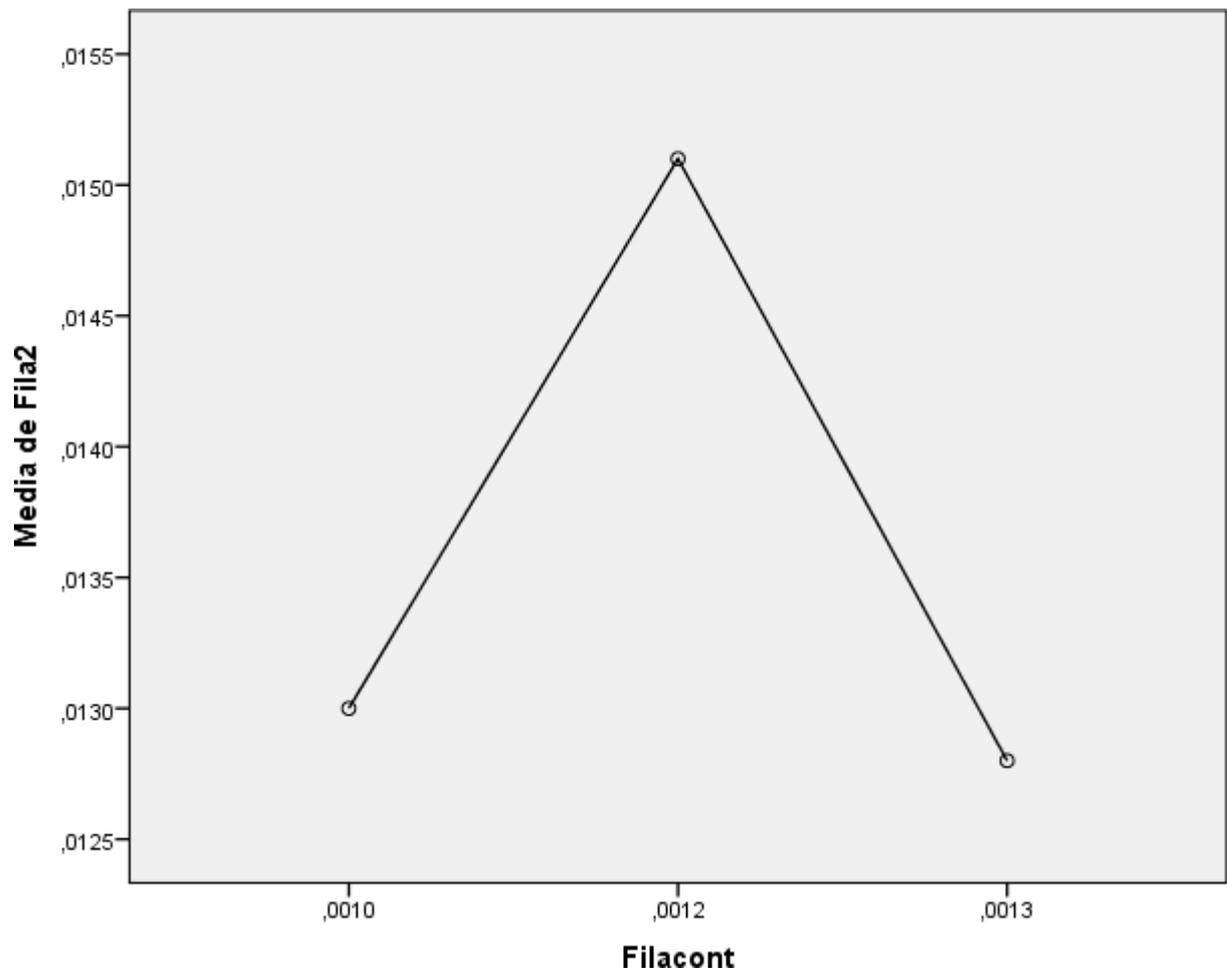


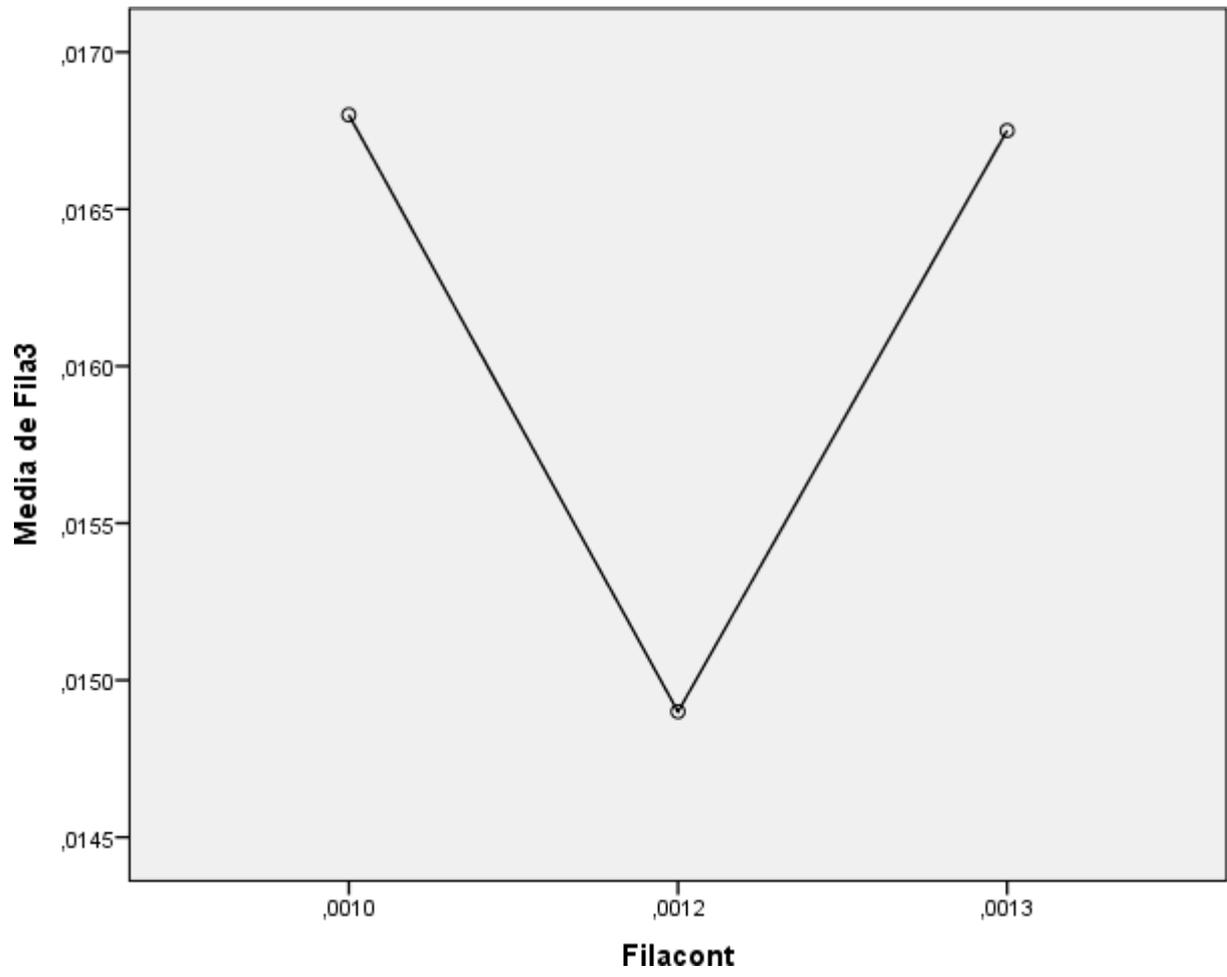




Anexo III: Gráficos de promedio del peso de la biomasa a los 30 días







UNEMI
UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

¡Evolución académica!

@UNEMIEcuador

