UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE
MICROBIOLOGÍA - PARASITOLOGÍA

TESIS

Eficiencia en la degradación de microplásticos de polietileno de baja densidad en consorcios de hongos aislados del botadero de residuos sólidos “Pampas de Reque”

Presentada para optar el Título Profesional de Licenciado en Biología – Microbiología - Parasitología

Autor:

Bach. Carlos Enrique Reynoza Sánchez

Asesora:

Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán

Lambayeque, Perú

2026

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE
MICROBIOLOGÍA - PARASITOLOGÍA

TESIS

Eficiencia en la degradación de microplásticos de polietileno de baja densidad en consorcios de hongos aislados del botadero de residuos sólidos “Pampas de Reque”

Carlos Enrique Reynoza Sánchez

Presentada para optar el Título Profesional de Licenciado en Biología – Microbiología - Parasitología

APROBADA POR:

Dr. Carlos Eduardo Villanueva Aguilar
PRESIDENTE

Dra. Gianina Llontop Barandiaran
SECRETARIA

MSc. Adela Jaramillo Llontop
VOCAL

Dra. Carmen Carreño Farfán
ASESORA

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 42-2026 / FCCBB-UI

Siendo las 11:00 horas del día 09 de julio de 2026, en la Sala de Sesiones - Sustentaciones de la Facultad de Ciencias Biológicas se reunieron los miembros del Jurado designado mediante **Resolución N° 032-2023-FCCBB/D de fecha 06 de febrero de 2023 y aprobado mediante Resolución N° 269-2023-FCCBB/D de fecha 11 de octubre de 2023,** conformado por:

Dr. Carlos Eduardo Villanueva Aguilar-Presidente
Dra. Gianina Llontop Barandiaran- Secretaria
Mg. Adela Jaramillo Llontop- Vocal
Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán- Asesora

con la finalidad de evaluar la sustentación de tesis titulada: **"Eficiencia en la degradación de microplásticos de polietileno de baja densidad en consorcios de hongos aislados del botadero de residuos sólidos "Pampas de Reque",** siendo el responsable el Bachiller **CARLOS ENRIQUE REYNOZA SÁNCHEZ.**

Sustentación autorizada mediante **RESOLUCIÓN N° 230-2026-FCCBB-D Lambayeque, 08 de julio de 2026** la misma que tuvo una duración de 30 minutos y luego de absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado; se procedió a la calificación respectiva, obteniendo 19 puntos que equivale al calificativo de Muy Bueno.

Por lo que el sustentante queda **APTO** para obtener el Título Profesional de **Licenciado en Biología - Microbiología - Parasitología** de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ciencias Biológicas y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las 12:00 horas se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto, con la firma de los miembros del jurado.

Dr. Carlos Eduardo Villanueva Aguilar
Presidente

Dra. Gianina Llontop Barandiaran
Secretaria

Mg. Adela Jaramillo Llontop
Vocal

Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán
Asesora

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

Yo, Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán, usuario revisor del informe de tesis titulado: Eficiencia en la degradación de microplásticos de polietileno de baja densidad en consorcios de hongos aislados del botadero de residuos sólidos “Pampas de Reque”. Cuyo autor es, Bach. Carlos Enrique Reynoza Sánchez con DNI: 75537254; declaro que la evaluación realizada por el Programa Informático, ha arrojado un porcentaje de 19 %, verificable en el Resumen de Reporte automatizado de similitudes que se acompaña.

El suscrito analizó dicho reporte y concluyó que cada uno de las coincidencias detectadas dentro del porcentaje de similitud permitido no constituyen plagio y que el documento cumple con la integridad científica y con las normas para el uso de citas y referencias establecida en los protocolos respectivos.

Se cumple con adjuntar el Recibo Digital a efecto de la trazabilidad respectiva del proceso.

Lambayeque, 12 de marzo de 2026



Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán

DNI: 16494424

ASESORA

Eficiencia en la degradación de microplásticos de polietileno de baja densidad en consorcios de hongos aislados del botadero de residuos sólidos "Pampas de Reque"

INFORME DE ORIGINALIDAD

19%	19%	2%	1%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unprg.edu.pe Fuente de Internet	16%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
3	Harrison de la Rosa Ramírez. "Desarrollo de formulaciones de ácido poliláctico (PLA) basadas en la incorporación de derivados de la colofonia", Universitat Politecnica de Valencia, 2023 Publicación	<1%
4	pdfcoffee.com Fuente de Internet	<1%
5	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1%
6	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	<1%
7	repositorio.uta.edu.ec Fuente de Internet	<1%
8	Submitted to Universidad Politécnica del Perú Trabajo del estudiante	<1%
9	Submitted to ucss Trabajo del estudiante	<1%

Excluir citas	Activo	Excluir coincidencias	< 15 words
Excluir bibliografía	Activo		

Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán
DNI: 16494424
ASESORA

turnitin

Recibo digital

Este recibo confirma quesu trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega:	Carlos Enrique Reynoza Sanchez
Título del ejercicio:	Quick Submit
Título de la entrega:	Eficiencia en la degradación de microplásticos de polietileno d...
Nombre del archivo:	TESIS_CARLOS_REYNOZA_-PARA_TURNITIN.pdf
Tamaño del archivo:	1.43M
Total páginas:	50
Total de palabras:	9,704
Total de caracteres:	50,625
Fecha de entrega:	12-mar-2026 07:07p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega:	2901684710



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE
MICROBIOLOGÍA Y PARASITOLOGÍA

TESIS

Eficiencia en la degradación de microplásticos de polietileno de baja densidad en consorcios de hongos aislados del botadero de residuos sólidos "Pampas de Reque"

Presentada para optar el Título Profesional de Licenciado en Ciencias Biológicas – Microbiología - Parasitología

Autor:
Bach. Carlos Enrique Reynoza Sanchez

Asesora:
Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán

Lambayeque, Perú

2026

Derechos de autor 2026 Turnitin. Todos los derechos reservados.

Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán
DNI: 16494424
ASESORA

DEDICATORIA

A Dios:

Por dotarme de sabiduría y de tenacidad necesaria para finiquitar esta etapa de especialización profesional.

A mis padres:

Por ser el soporte de mis valores y su acompañamiento constante en este camino académico. Este logro es la prueba de su confianza y de ser la guía divina en mi vida.

El autor.

AGRADECIMIENTO

En primera instancia a Dios:
Por ser mi mentor espiritual, dotarme de salud y bonanzas necesarias para hacer frente a los desafíos que este grado académico presenta. Su presencia en todo momento ha sido un apoyo en los eventos de mayor rigor.

A mis seres queridos:
Por su tenacidad constante y la compresión invaluable de mi tiempo de ausencia; su acompañamiento ha sido la base que sostuvo este proyecto de vida.

A mi asesora:
La Dra. Carmen Carreño Farfán, a quien extiendo mi más profundo agradecimiento, por su paciencia y sus preciadas orientaciones, logrando con sus aportes elevar la calidad del presente trabajo de investigación y llevarlo a la culminación.

INDICE GENERAL

RESUMEN ……. 1
ABSTRACT ……..... 2
INTRODUCCIÓN …….. 3
CAPITULO I. DISEÑO TEÓRICO ……... 7
1.1. Antecedentes …… 7
1.2. Bases teóricas …….. 11
1.3. Operacionalización de variables ……..… 17
CAPITULO II. DISEÑO METODOLÓGICO ……... 18
2.1 Diseño de la contrastación de hipótesis…… 18
2.2 Población y muestra ……. 18
2.3 Técnica, instrumentos y materiales ……. 18
2.3.1 Técnica ……... 18
2.3.2 Instrumento…… 18
2.3.3 Materiales ……. 18
2.4 Procedimiento…….. 19
2.5 Procesamiento y análisis de datos……... 23
CAPITULO III. RESULTADOS ……... 24
CAPITULO IV. DISCUSIÓN……. 45
CONCLUSIONES ……. 50
RECOMENDACIONES …… 51
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ……... 52
ANEXOS …… 61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tratamientos, para determinar la eficiencia de cuatro consorcios de hongos en la degradación de microplásticos de LDPE…… 19

Tabla 2 Características macroscópicas de los morfotipos de colonias de hongos filamentosos aislados del botadero de residuos sólidos "Pampas de Reque", Lambayeque 2023 ……. 26

Tabla 3 Frecuencia de los morfotipos de colonias de hongos filamentosos aislados de suelo y fragmentos de plásticos cultivados en agar sales minerales con microplásticos de LDPE, Lambayeque 2023... 27

Tabla 4 Morfotipo de colonia y género de hongos calificados como degradadores de LDPE, Lambayeque 2023……. 31

Tabla 5 Frecuencia de géneros de hongos degradadores de LDPE aislados del botadero de residuos sólidos "Pampas de Reque", Lambayeque 2023……... 36

Tabla 6 Rango en la biomasa formada por hongos filamentosos en LDPE como fuente de carbono, Lambayeque 2023…….. 41

Tabla 7 Biomasa formada con LDPE y glucosa como fuentes de carbono por los hongos degradadores seleccionados, Lambayeque 2023……. 41

Tabla 8 Prueba de comparaciones múltiples de Tukey del peso perdido por los microplásticos de LDPE degradados por consorcios de hongos durante 90 días……... 42

Tabla 9 Tasa de reducción, vida media y resistencia a la tracción de microplásticos de LDPE degradados por consorcios de hongos filamentosos…… 43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Hongos filamentosos aislados del suelo y plásticos del botadero de residuos sólidos "Pampas de Reque", Lambayeque 2023……... 25

Figura 2 Morfotipo 10 de colonia de hongo filamentoso desarrollado en agar sales minerales con LDPE como fuente de carbono, Lambayeque 2023……... 25

Figura 3 Micelio oscuro y claro de hongos filamentosos desarrollados por 30 días (a), 60 días (b) y 90 días (c) en caldo sales minerales con un fragmento de LDPE... 28

Figura 4 Observaciones microscópicas de micelio y estructuras reproductivas en fragmentos de LDPE colonizados por hongos degradadores, Lambayeque 2023……... 29

Figura 5 Hongos degradadores de LDPE reaislados en agar papa dextrosa, Lambayeque 2023……. 30

Figura 6 Colonia y observación microscópica (400x) de *Fusarium* sp. 6, Lambayeque 2023……... 32

Figura 7 Colonia y observación microscópica (400x) de *Fusarium* sp. 4, Lambayeque 2023……... 32

Figura 8 Colonia y observación microscópica (400x) de *Fusarium* sp. 5, Lambayeque 2023……... 33

Figura 9 Colonia y observación microscópica (400x) de *Alternaria* sp. 3, Lambayeque 2023……... 33

Figura 10 Colonia y observación microscópica (400x) de *Cunninghamella* sp. 2, Lambayeque 2023……. 34

Figura 11 Colonia y observación microscópica (400x) de *Aspergillus* sp. 10, Lambayeque 2023……. 34

Figura 12 Colonia y observación microscópica (400x) de *Stachybotrys* sp. 11, Lambayeque 2023……. 35

Figura 13 Colonia de *Memnoniella* sp. 8 en agar papa dextrosa, Lambayeque 2023……. 35

Figura 14 *Fusarium* sp. 6 (a) y *Fusarium* sp. 4 (b) cultivados en caldo mínimo sales con glucosa y LDPE como fuente de carbono, Lambayeque 2023……... 38

Figura 15 *Fusarium* sp. 5 (a) y *Alternaria* sp. 3 (b) cultivados en caldo mínimo sales con glucosa y LDPE como fuente de carbono, Lambayeque 2023……... 38

Figura 16 *Cunninghamella* sp. 2 (a) y *Memnoniella* sp. 8 (b) cultivados en caldo mínimo sales con glucosa y LDPE como fuente de carbono, Lambayeque 2023…… 39

Figura 17 *Aspergillus* sp. 10 (a) y *Stachybotrys* sp. 11 (b) cultivados en caldo mínimo sales con glucosa y LDPE como fuente de carbono, Lambayeque 2023…… 39

Figura 18 Biomasa en fresco de hongos degradadores desarrollados en caldo mínimo sales con LDPE como fuente de carbono, Lambayeque 2023…… 40

RESUMEN

Los plásticos derivados del petróleo son los polímeros de bajo costo de mayor uso; no obstante, después de ser utilizados en su mayoría son descartados, no son dispuestos de manera adecuada y debido a que son resistentes a la biodegradación son persistentes y contaminan el ambiente. El objetivo de la investigación fue determinar la eficiencia en la degradación de microplásticos de polietileno de baja densidad (LDPE) por los consorcios de hongos aislados del botadero de residuos sólidos "Pampas de Reque". Se identificó a nivel fenotípico el género de los hongos filamentosos degradadores de LDPE, se seleccionaron los hongos degradadores con base a la biomasa formada en LDPE en polvo como fuente de carbono y se comparó la eficiencia en la degradación de microplásticos de LDPE por cuatro consorcios de hongos. En el 77,78 % de las muestras de suelo y fragmentos de plástico deteriorado, cuyos microorganismos fueron enriquecidos por 60 días se aislaron 42 hongos, entre los cuales 17 (40,52 %) fueron calificados como degradadores de LDPE y se identificaron en los géneros Fusarium (29,4 %), Cunninghamella (23,5 %), Memnoniella (17,6), Alternaria (11,8), Aspergillus (11,8 %) y Stachybotrys (5,9 %). Los hongos seleccionados con base a la biomasa formada en el polímero en polvo como fuente de carbono fueron *Alternaria* sp. 3 (0,55 g), *Fusarium* sp. 6 (0,63 g) y Memnoniella sp. 8 (0,58 g). La eficiencia en la degradación de microplásticos de LDPE por tres de los cuatro consorcios fúngicos superó a los hongos en forma individual. La mayor eficiencia expresada como peso perdido (17,4 %) y reducción en la fuerza de tracción del LDPE (58,4 %) se alcanzó con el consorcio 3 constituido por *Alternaria* sp. 3 + *Memnoniella* sp. 8. Se concluyó que este consorcio tiene potencial para la degradación de microplásticos de LDPE en ambientes contaminados.

Palabras clave: Microplásticos, LDPE, Biodegradación, Consorcios fúngicos

ABSTRACT

Petroleum-derived plastics are the most widely used low-cost polymers; however, after use, most are discarded, improperly disposed of, and, due to their resistance to biodegradation, persistent and polluting the environment. The objective of this research was to determine the efficiency of low-density polyethylene (LDPE) microplastic degradation by fungal consortia isolated from the “Pampas de Reque” solid waste landfill. The genera of filamentous fungi that degrade LDPE were phenotypically identified, fungi were selected based on the biomass formed on powdered LDPE as a carbon source, and the degradation efficiency of four fungal consortia was compared. In 77.78% of the soil samples and fragments of deteriorated plastic, whose microorganisms were enriched for 60 days, 42 fungi were isolated. Of these, 17 (40.52%) were classified as LDPE degraders and were identified as belonging to the genera Fusarium (29.4%), Cunninghamella (23.5%), Memnoniella (17.6%), Alternaria (11.8%), Aspergillus (11.8%), and Stachybotrys (5.9%). The fungi selected based on the biomass formed on the powdered polymer as a carbon source were Alternaria sp. 3 (0.55 g), Fusarium sp. 6 (0.63 g), and Memnoniella sp. 8 (0.58 g). The efficiency in LDPE microplastic degradation by three of the four fungal consortia surpassed that of the individual fungi. The greatest efficiency, expressed as weight loss (17.4%) and reduction in LDPE tensile strength (58.4%), was achieved with consortium 3, composed of Alternaria sp. 3 and Memnoniella sp. 8. It was concluded that this consortium has potential for the degradation of LDPE microplastics in contaminated environments.

Keywords: Microplastics, LDPE, Biodegradation, Fungal consortia

INTRODUCCION

Los plásticos derivados del petróleo son los polímeros de bajo costo de mayor uso en el mundo; no obstante, después de ser utilizados en su mayoría son descartados, no son dispuestos de manera adecuada y debido a que son resistentes a la biodegradación son persistentes y contaminan el suelo (Rüthi et al., 2023; Iqbal et al., 2020; Fuller y Gautham, 2016), agua (Al Nahian et al., 2023; Jones et al., 2022) y aire (Bao et al., 2022; Gobmann et al., 2022; Xie et al., 2022). Desde 1950 al 2017 se han producido 9200 millones de toneladas métricas (TM) y de todo el plástico descartado 32 % terminó en los diferentes ecosistemas, 40 % en los vertederos, 14 % fue incinerado y 14 % fue reciclado. Asimismo, solo el 2 % de estos residuos fueron reciclados en óptimas condiciones y el 12 % en procesos no adecuados, con un producto de muy baja calidad y funcionalidad (Williams y Rangel, 2022).

Se ha estimado que la producción de plástico alcanzará 33 billones TM el 2015, con predominio del polipropileno, PP (16 %), polietileno de baja densidad, LDPE (12 %), cloruro de polivinilo, PVC (11 %), polietileno de alta densidad, HDPE (10 %) y polietileno tereftelato, PET con 5 % (Kutralam et al., 2020). El LDPE es un termoplástico constituido por monómeros de etileno (Vertus et al., 2017) y se utiliza para la obtención de bolsas generalmente de un solo uso. En EEUU cada minuto se utiliza 1 millón de estas bolsas plásticas (Williams y Rangel, 2022), que en el ambiente pueden permanecer más de 100 años (Qiu et al., 2021). Se ha determinado que el LDPE en forma de bolsas es el plástico más abundante (69,13 %) descartado en los vertederos o en el ambiente (Montazer et al., 2019).

Los plásticos por acción de los factores ambientales se deterioran y fragmentan a partículas denominadas microplásticos grandes (1-5 mm) y pequeños (0.001-1 mm). Estos microplásticos secundarios junto a los microplásticos primarios constituyentes de los productos cosméticos (Mesquita et al., 2022) se encuentran en todos los ecosistemas e inclusive en ambientes extremadamente inaccsesibles (Tudor y Williams, 2021; Carvalho et al., 2021). El tamaño pequeño de los microplásticos facilita la ingestión por los animales en cuyo

tracto gastrointestinal son retenidos y causan perforación u obstrucción, con una "falsa llenura". Como consecuencia, los animales dejan de alimentarse y mueren (Yusuf et al., 2022). Los microplásticos presentan mayor área superficial, fuerte hidrobicidad y propiedades químicas estables y al igual que los plásticos se mantienen hasta 189 años en el ambiente (Qiu et al., 2021; Lopez et al., 2020). Su toxicidad se incrementa por su capacidad de adsorción. En los pellets plásticos se encuentran adheridos ftalatos, bisfenoles, pesticidas, organohalogenados, hidrocarburos aromáticos policíclicos y dioxinas (Raha et al., 2021). En este contexto, los microplásticos acarrean contaminantes químicos, metales pesados y microorganismos patógenos (Yuan et al., 2022; Schmaltz et al., 2020) y al ser consumidos ingresan en la cadena alimentaria y llegan al ser humano (Castañeta et al., 2020).

Se ha estimado que de los 275 millones TM de plásticos producidos cada año en 195 países, en promedio 4,8-12,7 millones TM ingresaron a los océanos (Tudor y Williams, 2021). La abundancia de microplásticos es mayor en el Océano Pacífico (279 microplásticos m^{-3}), en comparación con el Océano Atlántico (13,4 microplásticos m^{-3}), el Océano Índico (0,27 microplásticos m^{-3}) y el Océano Ártico con 0,8 microplásticos m^{-3} (Yusuf et al., 2022). En Latinoamérica y el Caribe se ha calculado que 1,15-12,7 millones TM de microplásticos ingresan cada año al océano (Mesquita et al., 2022; Mishra et al., 2022; Pérez et al., 2020). En las playas de un archipiélago de Brasil se cuantificaron 0,6-1059 partículas plásticas m^{-2}, de las que el 89,40 % se identificaron como microplásticos y en cuatro playas de la costa de Lima en Perú se cuantificaron 16,67-143,5 microplásticos m^{-2} (De la Torre et al., 2020).

El suelo se contamina con los plásticos de los residuos abandonados, plásticos de cobertura y lodos residuales y se han cuantificado hasta 67 5000 mg kg^{1} de suelo (Scheurer y Bigalke, 2018; Fuller y Gaautan, 2016). Los microplásticos constituyen superficies que son colonizadas por diversos microorganismos que alteran el ecosistema edáfico debido a que rápidamente originan una sucesión de comunidades microbianas y cambian las interacciones microbianas y sus funciones en el suelo (Awet et al., 2018). La atmósfera se contamina con microplásticos provenientes de la combustión y los residuos

urbanos fragmentados acarreados por el viento y se han cuantificado hasta 20166 micropartículas m^{-3} (Deghani et al., 2017). La exposición humana a los microplásticos es por inhalación, ingestión y contacto con la piel. Se ha estimado una ingesta anual de 39 000 – 52 000 microplásticos por persona y una absorción de 74 000 – 121 000 partículas por persona (Castañeta et al., 2020). Los microplásticos alteran el metabolismo, el sistema inmune, la respuesta inflamatoria y causan neurotoxicidad, carcinogenecidad y efectos nocivos indirectos al constituir vectores de contaminantes tóxicos y microorganismos patógenos (Rahman et al., 2020).

En la naturaleza se encuentran hongos que tienen la capacidad de degradar los microplásticos de LDPE (Sanchez - Purihuaman et al., 2025; Sutkar et al., 2025), no obstante, la eficiencia es muy baja (Kaur et al., 2022), por lo que se requiere la búsqueda de especímenes en diferentes ambientes contaminados, para caracterizarlos, seleccionarlos e incrementarlos en condiciones de laboratorio. Asimismo, para que se logre la mineralización de los microplásticos se necesita la acción de varias enzimas y vías metabólicas que generalmente no se encuentran en un solo organismo, pero si en los consorcios microbianos (Gaytán et al., 2020; Jaiswal et al., 2019), por lo que una vez caracterizados los microorganismos deben ser investigados en consorcios microbianos, con la perspectiva de utilizarlos en la limpieza de ambientes contaminados con microplásticos de LDPE.

Ante la problemática expuesta, se formuló el siguiente problema ¿Cuál es la eficiencia en la degradación de microplásticos de polietileno de baja densidad por los consorcios de hongos aislados del botadero de residuos sólidos “Pampas de Reque”?. Se formuló la siguiente hipótesis: Los consorcios de hongos aislados en el botadero de residuos sólidos Pampas de Reque, utilizan los microplásticos de polietileno de baja densidad como fuente de carbono y lo degradan con una eficiencia mayor al 15%.

El objetivo general de la investigación fue determinar la eficiencia en la degradación de microplásticos de polietileno de baja densidad (LDPE) por los consorcios de hongos aislados del botadero de residuos sólidos “Pampas de Reque”.

Los objetivos específicos fueron: identificar fenotípicamente el género de los hongos filamentosos degradadores de LDPE aislados del botadero de residuos sólidos “Pampas de Reque” en la provincia de Chiclayo, 2023; seleccionar los hongos degradadores con base a la biomasa formada en LDPE como fuente de carbono y comparar la eficiencia en la degradación de microplásticos de LDPE por cuatro consorcios de hongos.

CAPITULO I. DISEÑO TEÓRICO

1.1 Antecedentes

Sathiyabama et al. (2025) estudiaron la degradación de LDPE por hongos aislados de bolsas deterioradas de botaderos de residuos sólidos. Los hongos se cultivaron en caldo papa dextrosa suplementado con 0,5 % de LDPE en polvo y después de 24 horas los filtrados se centrifugaron y se depositaron sobre agar con 0,5 LDPE en polvo, se incubaron a 37 °C por 24 horas y se seleccionó al hongo que presentó el mayor halo alrededor de las colonias después de agregar rojo de Congo. Este hongo se cultivó en caldo papa dextrosa con fragmentos de LDPE a 35 °C por 7 días y se identificaron los cambios en las características físicas y químicas del polímero degradado. Se aislaron 33 hongos, entre los cuales se seleccionó *Cladosporium sphaerospermum* con el mayor halo en agar LDPE. (16 mm). En el ensayo de la degradación se determinó 15,12 % de peso perdido; una tasa de reducción de 22,4 mg día^{-1} y una vida residual de 30 días. Asimismo, la microscopía electrónica de barrido (SEM) identificó grietas, agujeros y rugosidades en el LDPE y la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) confirmó cambios en los grupos funcionales de la superficie.

Khan et al. (2022) estudiaron la degradación del LDPE por *Penicillium citrinum* con y sin tratamiento con ácido nítrico. Los hongos aislados del suelo de vertederos de residuos sólidos se cultivaron en medio sales mínimo con 3 % de LDPE como fuente de carbono y aquellos con halos alrededor de las colonias se seleccionaron para estudiar la degradación del polímero tratado y no tratado. Cada 15 días, durante 90 días se determinó el peso del LDPE perdido, la actividad de las enzimas lactasa y peroxidasa y la biomasa del hongo formada. Se obtuvieron 16 hongos aislados entre los que *P. citrinum* formó biopelícula en la superficie del polímero mediante FTIR se determinaron cambios químicos en la superficie del LDPE pretratado y biodegradado por 90 días y mediante SEM se verificó la adherencia de biomasa y esporas, cavidades, arrugas y grietas en la superficie. El peso del LDPE disminuyó 47,22 % con el pretratamiento y 38,82 % en el testigo. El ácido nítrico aumentó la degradación del LDPE por *P. citrinum*.

Mohy et al. (2022) investigaron microorganismos aislados del suelo rizosférico de manglares y su potencial para la despolimerización de bolsas de LDPE. Los microorganismos se cultivaron en medio mínimo sales minerales con 1 % de diferentes fuentes de carbono: bolsas de polietileno, hexadecano, polietilenglicol y rojo de Congo. Las bolsas se esterilizaron junto con el medio de cultivo y se agregó 1 g de nitrato de amonio cada 15 días durante la incubación, a 35 °C por 105 días. Se determinó el porcentaje de peso perdido de los polímeros y éstos se analizaron mediante FTIR y SEM. Se seleccionaron *Bacillus* sp., *Penicillium* sp. y *Aspergillus terreus* debido a que mostraron capacidad para utilizar el polietileno y los poliésteres como el polietilenglicol con fuentes de carbono. *A. terreus* disminuyó los índices carbonilo (0,702) y cristalinidad (46 %) en comparación con el control con 0,95 y 63 % respectivamente. Se demostró el potencial de *A. terreus* para la degradación de LDPE.

Ali et al. (2022) investigaron la degradación de LDPE por *Fusarium equiseti* y *Brevibacillus parabrevis*. Los microorganismos de suelo y agua contaminados con plásticos se cultivaron en medio sales minerales con fragmentos (1,5x1,5 cm) de LDPE, a 30 °C por 21 días. La degradación del polímero se calificó con el grado I por observación del ataque microbiano de la superficie o penetración de las hifas, grado II por los cambios en la morfología superficial (SEM), grado III por FTIR con detección de los cambios en los grupos funcionales y grado IV por el porcentaje del peso perdido. Se identificaron los géneros de hongos *Aspergillus*, *Alternaria*, *Trichoderma*, *Cladosporium*, *Penicillium, Rhizopus* y *Fusarium* y la bacteria *Brevibacillus sp*. En el LDPE se observó penetración de las hifas por *F. equiseti* y grietas y agujeros por efecto de *B. parabrevis*. El espectro FTIR demostró la desaparición de las bandas a 1362,22 cm^{-1} y 908,56 cm^{-1}, correspondientes a los enlaces C=C y C-H. Asimismo, se demostró pérdida de 40 % del peso del polímero con *B. parabrevis* y 45 % con *F. equiseti*. Los resultados evidenciaron la degradación del LDPE por *F. equiseti* y *B. parabrevis*.

Saira et al. (2022) estudiaron la degradación de bolsas de LDPE por hongos aislados de suelo de vertederos. Las muestras de suelo se colectaron a 3-5 cm de profundidad, se diluyeron en solución salina esterilizada, alícuotas se sembraron en caldo mínimo sales minerales con discos (2x2 cm^2) de LDPE, se

incubaron a 28°C, 150 rpm y después de 30 días se determinó el porcentaje de pérdida de peso por gravimetría y los cambios funcionales y la deformación de los enlaces por FTIR. Entre los hongos aislados se identificaron *A. niger*, *A.flavus*, *Penicillium* sp. y dos hongos no esporulantes. Todos a excepción de *Penicillium* sp. disminuyeron el peso del LDPE y alcanzaron 16,1-22,9 % de pérdida. El mayor porcentaje correspondió a *A. niger*. El análisis por FTIR demostró alteración en los grupos funcionales y deformación de los enlaces C-H, cetonas y dobles enlaces en los alcanos. Se concluyó que *A. niger* tiene potencial para la biorremediación de suelo contaminado con LDPE.

Saxena et al. (2021) investigaron el potencial de degradación del LDPE por hongos aislados de plásticos deteriorados cercanos a cuerpos de agua. Los hongos se cultivaron en caldo Sabouraud dextrosa modificado a pH 5,6 en el que se depositaron tiras (1x1 cm) de LDPE y se incubaron a 27 °C por 15-30 días, a 250 rpm. Las tiras del polímero se extrajeron, se secaron, se examinaron bajo SEM, se pesaron y se calculó el porcentaje del peso perdido. Asimismo, se determinó el peso de la biomasa formada y el pH del medio de cultivo. Se aislaron 10 hongos de los géneros Penicillium, Chaetomium, Memnoniella, Aspergillus, Stachybotris, Fusarium y Rhizopus. La pérdida del peso fue de 0,01-4 % (15 días) y 5-28 % (30 días) y los mayores valores se alcanzaron con *A. niger* y *A. fumigatus* (15 días) y *A. niger* (30 días). El rango de pH fue de 6,4-7,6 (15 días) y 6,3-7,6 (30 días) y los mayores valores en el peso de la biomasa formada a los 30 días correspondieron a *A. niger. A., fumigatus y A. flavus*. El análisis SEM demostró adherencia del micelio y grietas en la superficie del polímero. Se demostró la degradación del LDPE por los hongos aislados de plásticos deteriorados.

Zhang et al. (2020) investigaron la degradación de microplásticos de polietileno por *A. flavus* aislado del contenido intestinal de *Galleria mellonella*. Los hongos se mantuvieron en caldo y agar papa dextrosa, se cultivaron en caldo mínimo sales minerales con LDPE y HDPE como fuentes de carbono por 3 días y la degradación se evaluó en forma preliminar por la turbidez y el número de partículas del polímero suspendidas como consecuencia de los cambios en la hidrofobicidad. Se aislaron 25 hongos entre los que se seleccionó *A. niger* por su desarrollo en agar y caldo mínimo con LDPE y HDPE. Este hongo se adhirió a la

superficie del HDPE con 3,9 % de pérdida de peso después de 28 días y en el análisis FTIR se observaron nuevos picos en el rango 3500-3100 cm^{-1} (grupos hidroxilo), 1113 cm^{-1} (grupos éter -C-O-C-) y 1647-1716 cm^{-1} (grupos carbonilo - C=0). La aparición de nuevos grupos funcionales en el caldo cultivado demostró que *A. flavus* degradó el HDPE además del LDPE.

Gonzales (2020) investigó la capacidad degradativa de LDPE por hongos filamentosos aislados de un botadero de residuos sólidos. Se colectaron 20 muestras de envolturas de LDPE con signos de deterioro, se lavaron con solución salina, se fragmentaron y se sembraron en agar sales minerales con 3 % de extracto de malta. En los fragmentos de LDPE colonizados por los hongos con mayor crecimiento se investigó la degradación del polímero a 20 y 30 °C y pH 4,5 y 8 durante 60 días. La frecuencia de hongos aislados en el botadero fue de 46,67 % (*A. niger*); 16,67 % (*A. flavus*); 16,67 % (*A. fumigatus*); 13,33 % (*Mucor* sp.) y 6,67 % (*Fusarium* sp.). Los hongos seleccionados *A. niger* y *A. flavus* presentaron abundante y moderado crecimiento en el LDPE, calificado como bueno y muy bueno. *A. flavus* se adhirió al LDPE con una película gruesa de aspecto gelatinoso y alcanzó el mayor porcentaje de pérdida de peso del polímero con un pH 4,5 a 20-30 °C. Lo resultados demostraron que *A. flavus* tiene potencial para la degradación del LDPE a mayor escala.

Idowu et al. (2019) estudiaron la biodegradación del LDPE por bacterias y hongos aislados de plásticos de vertederos. Éstos se fragmentaron, pulverizaron, se cultivaron en caldo mínimo sales minerales modificado y después de 14 días los microorganismos se aislaron en agar sales minerales con LDPE. Éstos se cultivaron bajo tres condiciones: LDPE como fuente de nitrógeno, de carbono y nitrógeno-carbono a la vez y se determinó el porcentaje de peso perdido y los cambios en el polímero mediante FTIR. Se obtuvieron 81 hongos y 114 bacterias, entre los que dos hongos y ocho bacterias crecieron con el LDPE. Se identificaron *A. flavus* MCP5, MMP10, *Acinetobacter* sp., *Bacillus* spp., *Staphylococcus* sp., *Pseudomonas* sp. y *Micrococcus* sp. El porcentaje de peso perdido fue de 0,83-1,67 % en comparación con 0,33 % en el testigo. FTIR demostró la desaparición de los picos iniciales, aparición de nuevos picos y disminución de algunos picos en los enlaces 0-H, C-H, C=C, CH_2 y C-0. Los microorganismos

degradaron el LDPE en presencia y ausencia de otras fuentes de carbono y nitrógeno.

Munir et al. (2018) determinaron las características de hongos degradadores de LDPE aislados del suelo de vertederos de residuos sólidos. Las muestras de suelo se sembraron en agar Sabouraud dextrosa, los hongos aislados se cultivaron en caldo mínimo sales minerales con LDPE y se seleccionaron aquellos que presentaron crecimiento a 30 °C, 100 rpm durante 45 días. Éstos se cultivaron en medio sólido con una película de LDPE durante. 45 días y se determinó el porcentaje de peso perdido en el polímero y la variación de la fuerza de tracción. Se aislaron ocho colonias de hongos entre los que el 25 % creció en caldo con LDPE como fuente de carbono. *Trichoderma viride* y *Aspergillus nonius* colonizaron la superficie del polímero, lo degradaron con 5,13 y 6,30 % de pérdida del peso y degradación en 58 y 40 % la fuerza de tracción respectivamente después de 45 días de incubación. Se evidenció la capacidad de los hongos para la degradación del LDPE.

1.2 Bases teóricas

Los plásticos derivados del petróleo o petroplásticos son compuestos químicos con moléculas constituidas por monómeros unidos con enlaces covalentes. Los petroplásticos con enlaces C-C corresponden al 77 % del mercado mundial y son el polietileno de tereftalato (polyethylene terephthalato, PET), polietileno (PE) de alta densidad (high-density polyethylene, HDPE), cloruro de polivinilo (polyvinyl chloride, PVC), polietileno de baja densidad (low-density polyetylene, LDPE), polipropileno (polypropylene, PP) y poliestireno (polystyrene) PS (Ali et al., 2021; Ccallo et al., 2020). Las propiedades térmicas de los plásticos los agrupan en termoplásticos y termoelásticos. Los primeros pueden ser calentados sin ningún cambio en su composición y por tanto pueden ser moldeados varias veces, como sucede con el PP, PE, PVC, PS y politetrafluoroetileno (PTFE). Los termoplásticos como los poliuretanos no pueden ser calentados y moldeados por segunda vez (Zeenat et al., 2021).

El polietileno es sintetizado por la polimerización del monómero etileno y es el más utilizado a nivel mundial, con una producción de más de 100 millones TM cada año (Danso et al., 2019; Jordan et al., 2016). Considerando el número de carbonos, el polietileno puede ser de baja densidad (low-density PE, LDPE) con 0,92 g cm^{-3} y de alta densidad (high-density PE, HDPE) con 0,96 g cm^{-3} (Yuan et al., 2022). El HDPE resiste 120 °C y se utiliza en el sector de construcción. El LDPE soporta 80-95 °C por corto tiempo, es translúcido con algunas excepciones, su estructura, presenta en promedio 2 % de átomos de carbono, muchas ramificaciones, es flexible y resistente (Rodríguez et al., 2020).

El tamaño de los plásticos los categoriza en megaplásticos (>1 m), macroplásticos (<1m), mesoplásticos (<2,5 cm) y microplásticos con menos de 5 mm (Thushari y Senevirathna, 2020). Los microplásticos son clasificados como primarios cuando son liberados en forma directa como partículas o “pellets” en el ecosistema y son secundarios cuando provienen de la fragmentación o desintegración de otros plásticos (Yusuf et al., 2022). Los microplásticos primarios (PMPs) son productos industriales como los remanentes de la pasta de dientes, gel para el cabello, productos de limpieza, ambientadores de partículas e ingresan al ambiente a través de las aguas residuales. Los microplásticos secundarios (SMPs) derivan de los macroplásticos y mesoplásticos impactados por procesos físicos, químicos y biológicos. Los microplásticos son partículas con un diámetro menor de 5 mm (1-5 mm). Se agrupan en microplásticos pequeños (0,001-1mm) y grandes (1-5mm). El tamaño mínimo de los microplásticos es 0,1um (Yuan et al., 2022). El término nanoplástico aún está en debate para las partículas de 1000 nm (1 um) o 100 nm :0,1 um (Rahman et al., 2020).

Los tipos de microplásticos son películas, esferas, fibras, espumas y partículas, según el color son transparentes, cristalinos, blancos, blanco-cremosos, rojos, anaranjados, azules, negros, grises, marrones, verdes, rosados, amarillos y según el grado de erosión: frescos, con cambios iniciales, con grietas, con surcos impermeables, superficie irregular, fragmentos irregulares, con fracturas lineales, crestas subparalelas y con degradación (Yuan et al., 2022). El tamaño pequeño de los microplásticos facilita la ingestión por los animales, en cuyo tracto gastrointestinal son retenidos y ocasionan obstrucción y perforación.

Como consecuencia, los animales dejan de alimentarse y mueren. Los microplásticos se han encontrado en más de 600 organismos terrestres y acuáticos, así como también en alimentos de humanos como miel, sal de mesa, cerveza y agua de bebida (Yusuf et al., 2022).

Los plásticos degradables pueden ser fotodegradables, bioplásticos compuestos por recursos biológicos, bioplásticos compatibles y plásticos biodegradables. Los fotodegradables son sensibles a la luz y bajo exposición a la radiación ultravioleta por mucho tiempo pueden desintegrarse. En los plásticos compuestos por recursos biológicos, el 100 % del carbono es obtenido de recursos renovables provenientes de la agricultura y de los forestales. Los bioplásticos compatibles se descomponen sin liberación de materiales tóxicos y los plásticos biodegradables son aquellos que por acción de los microorganismos se desintegran en dióxido de carbono, biogás y biomasa (Zeenat et al., 2021).

Los residuos sólidos son aquellos sólidos o semisólidos de los que su generador está obligado a disponer según la normatividad nacional. Estos residuos deberían ser dispuestos en rellenos sanitarios para su descomposición no riesgosa; no obstante, más del 50 % son abandonados en el ambiente o en los botaderos, lugares inapropiados, donde se descomponen en forma no controlada, generan riesgos para la salud humana e impactan de forma negativa el ambiente (Ministerio del Ambiente, MINAM, 2016). Los distritos de José Leonardo Ortiz, La Victoria y Reque de la provincia de Chiclayo amontonan sus residuos en el denominado “Botadero de Reque”, que no cuenta con las condiciones requeridas para la disposición final y constituye un foco infeccioso (Organización para el Desarrollo Sostenible AMBIDES, 2012). En los botaderos o en los vertederos de residuos sólidos se encuentran los plásticos con deterioro y en proceso de degradación por lo es posible el aislamiento de microorganismos eficientes en la degradación de este polímero contaminante del ambiente (Khan et al., 2022; Saira et al., 2022; Gonzales., 2020).

La degradación del PE es consecuencia de factores físicos como la humedad, térmicos como la elevada temperatura, luz solar, químicos como el oxígeno y biológicos por actividad de los microorganismos. La degradación microbiana puede ser aerobia en el suelo y ambientes acuáticos con producción

de dióxido de carbono y agua y la degradación es anaerobia en los vertederos y sedimentos con generación de agua, dióxido de carbono y metano (Rodríguez et al., 2020).

La biodegradación del PE ocurre en cuatro etapas. La primera es la colonización o formación de biopelículas, la segunda es la biodeterioración que cambia las propiedades físicas y químicas del polímero, en la tercera etapa se observa la fragmentación o ruptura del polímero (oligómeros, dímeros y monómeros) por acción enzimática y la cuarta etapa corresponde a la asimilación y consecuentemente la mineralización u oxidación (Ali et al., 2021; Rodríguez et al., 2020).

Los plásticos pueden por degradados por bacterias (Rani et al., 2022; Khandare et al., 2022; Krishnaswamy et al., 2022), hongos (Kunlere et al., 2019; Munir et al., 2018) y por insectos y microorganismos asociados (Zhang et al., 2020). El mecanismo de degradación de los plásticos por los hongos involucra la acción de sistemas enzimáticos intracelulares y extracelulares. El sistema intracelular actúa como un mecanismo de detoxificación y ayuda al hongo en el proceso de adaptación. Está mediado por los citocromos P, epoxidasas y transferasas. Los citocromos P son importantes en el metabolismo primario, mejoran la protección de las hifas, la integridad de la pared celular y la formación de las capas externas de las esporas. El sistema extracelular consiste de hidrolasas que degradan los polisacáridos y del sistema oxidativo inespecífico que rompe la estructura de diversos sustratos. Este sistema incluye peroxidasas, lacasas y peroxigenasas que transfieren los electrones desde los sustratos orgánicos al oxígeno molecular (Srikanth et al., 2022).

Las lacasas son oxidasas que utilizan el oxígeno como aceptor de electrones y lo convierten en agua durante la oxidación de compuestos fenólicos y no fenólicos. Las peroxidasas como la lignina peroxidasa, manganeso peroxidasa y peroxidasas versátiles catalizan reacciones de oxido-reducción por acción de radicales libres para formar compuestos oxidados y polimerizados. Otras enzimas utilizadas por los hongos en la degradación de los plásticos son las cutinasas que hidrolizan los poliésteres con alto peso molecular, las lipasas que actúan sobre los lípidos con generación de ácidos grasos y glicerol, las esterasas

que incorporan moléculas de agua en los ésteres y los fragmentan hasta alcoholes y ácidos y las proteasas que rompen las cadenas de péptidos largos en péptidos cortos o rompen las proteínas en cadenas de polipéptidos mediante la proteólisis (Temporiti et al., 2022; Srikanth, 2022).

La biodegradación de los microplásticos incluye una degradación inicial por oxidación e hidrólisis que origina partículas de menor tamaño, degradación de los polímeros a sus oligómeros, dímeros y monómeros y mineralización hasta dióxido de carbono, agua (aerobiosis) y metano (anaerobiosis). Las hidrolasas (lipasas, esterasas, depolimerasas y cutinasas) son enzimas extracelulares que rompen la superficie del plástico. Las enzimas extracelulares (esterasas, lipasas, lignina peroxidasas, lacasas y manganeso peroxidasas) microbianas son esenciales para incrementar la hidrofilicidad de los plásticos mediante la conversión a grupos carbonilo o alcoholes en los que se mejora la adherencia (Miri et al., 2022).

Debido a que los microplásticos son una mezcla de diversos polímeros los métodos de degradación deben ser optimizados mediante la bioestimulación, bioaumentación, microorganismos nativos de ambientes contaminados, microorganismos modificados genéticamente, adición de biosurfactantes y biodegradación enzimática. La bioestimulación es la adición de nutrientes que estimulan a los microorganismos degradadores propios de los ambientes contaminados. La bioaumentación es el incremento de los microorganismos mediante la adición de bacterias, hongos, consorcios microbianos o microorganismos modificados genéticamente. La degradación de los microplásticos es más efectiva con el uso de consorcios microbianos porque se tiene una mejor actividad catabólica para la degradación del polímero (Miri et al., 2022).

Los géneros de hongos reportados como degradadores del polietileno de baja densidad son *Trichoderma* (Munir et al., 2018), Aspergillus (Idowu et al., 2019), Mucor, Fusarium (Gonzales, 2020), Penicillium (Khan et al., 2022), *Alternaria*, *Cladosporium* (Ali et al., 2022), Phanerochaete, Bjerkandera, Pleurotus, Agaricus (Srikanth et al., 2022), Chaetomium, Mennoniella, Stachybotrys y Rhizopus (Saxena et al., 2021).

Las especies de Aspergillus están entre las más eficientes degradadoras de LDPE y se ha reportado *A. flavus* (Zhang et al., 2020), *A. niger* (Saira et al., 2022), *A.terreus* (Mohy et al., 2022)., *A. fumigatus* (Saxena et al, 2021), *A. oryzae* (Mostajo y Ambur, 2022), *A. nidulans, A. nomius* y *A. glaucus* (Srikanth et al., 2022).

1.3 Bases Conceptuales: Operacionalización de variables

Variable	Tipo de variable	Definición conceptual	Indicadores	Escala de medición
Consorcios de hongos	Independiente	Organismos eucariotas que crecen a través de hifas, y que en conjunto constituyen el micelio. Estos organismos una vez caracterizados son agrupados para constituir consorcios con el fin de aumentar su actividad (Temporiti et al., 2022).	Biomasa (mg) Viabilidad	De razón Nominal
Eficiencia de la degradación de microplásticos de polietileno de baja densidad de (LDPE)	Dependiente	Grado cuantitativo de desintegración y pérdida de integridad física o estructural de las matrices de polietileno de baja densidad, determinado a través de la reducción del peso inicial de la masa polimérica, variaciones gravimétricas y alteración de sus propiedades mecánicas tras un periodo específico de exposición a agentes biológicos (Andia Corahua & Perez Cabrejos, 2020; Newrick et al., 2024).	Peso de LDPE perdido (%) Tasa de reducción (g día^{-1}) Vida media residual (días) Resistencia a la tracción (Mpa)	De razón De razón De razón De razón

CAPITULO II. DISEÑO METODOLÓGICO

2.1 Diseño de contrastación de la hipótesis

Se realizó una investigación con un enfoque descriptivo en la primera etapa y explicativo en la segunda etapa. En la investigación explicativa el diseño de investigación experimental fue completamente aleatorio (DCA) con cuatro tratamientos o consorcios de hongos (C1, C2, C3, C4) y se incluyeron como testigos los hongos cultivados de forma independiente (B1, B2, B3). Los tratamientos fueron siete cada uno con tres repeticiones y un total de 21 unidades experimentales (Tabla 1).

2.2 Población y muestra

En la identificación descriptiva estuvo constituida por el suelo del botadero de residuos sólidos “Pampas de Reque” y se trabajó con 37 muestras de suelo no probabilísticas y por conveniencia colectadas durante noviembre– diciembre de 2022. En la investigación explicativa la población y muestra no probabilística y por conveniencia fueron 21 unidades experimentales de los consorcios de hongos y hongos constituyentes de los consorcios degradadores de LDPE.

2.3 Técnica, instrumentos y materiales

2.3.1 Técnica: Cuantitativa observacional (Hernández et al., 2014).

2.3.2 Instrumento: Ficha de registro de datos.

2.3.3 Materiales: Muestra de suelo y fragmentos de bolsas de LDPE del botadero de residuos sólidos, microplásticos de LDPE (2000 mesh), hongos filamentosos.

Tabla 1

Tratamientos, para determinar la eficiencia de cuatro consorcios de hongos en la degradación de microplásticos de LDPE

Tratamientos	Repeticiones		
	r1	r2	r3
T1 Hongo B1	x	x	x
T2 Hongo B2	x	x	x
T3 Hongo B3	x	x	x
T4 Consorcio 1 (B1+B2)	x	x	x
T5 Consorcio 2 (B2+B3)	x	x	x
T6 Consorcio 3 (B1+B3)	x	x	x
T7 Consorcio 4 (B1+B2+ B3)	x	x	x

Se incluyó un control no inoculado

2.4 Procedimiento

2.4.1 Identificación fenotípica del género de los hongos filamentosos degradadores de LDPE aislados del botadero de residuos sólidos Pampas de Reque, Lambayeque 2023

El lugar de muestreo del suelo y fragmentos de plástico fue el botadero de residuos sólidos Pampas de Reque, en la provincia de Chiclayo, región Lambayeque. El distrito de Reque se encuentra ubicado en el kilómetro 752 de la carretera Panamericana Norte, a una latitud 06°52’00’’, longitud 79°49’27’’. El botadero Pampas de Reque se encuentra a 15 a msnm (Municipalidad Distrital de Reque, s.f.), abarca un área de 307 hectáreas y recibe un promedio de 1 057,769 toneladas de residuos sólidos al año (OEFA, 2021).

En el suelo del botadero de residuos sólidos donde se encuentran bolsas de LDPE deterioradas se delimitaron cuadrados de 20 x 20 cm, con una palana de mano se eliminaron los 5 cm de suelo superficial (Roy et al., 2021), se colectaron 500 g de suelo, se depositaron en bolsas con cierre hermético (15 x 15 cm) y se transportaron al laboratorio, para el aislamiento microbiano en el periodo de 12 horas luego de la colección (Shariyyachan et al., 2016).

Los hongos se aislaron del suelo mediante el método del enriquecimiento (Munir et al., 2018). Las muestras se homogenizaron, se pesaron submuestras de 10 g, se depositaron en 90 mL de caldo sales minerales con 0,1 % de LDPE como fuente de carbono (Anexo 1), se incubaron durante 60 días a 30°C y alícuotas del medio se sembraron en agar sales minerales con 0,1 % (p/v) de LPDE en polvo para posteriormente seleccionar las diferentes colonias de los hongos desarrollados y los cultivos puros se guardaron en refrigeración (4°C).

Los hongos se sembraron en 10 ml de caldo sales minerales con un fragmento (10 x 50 mm) de LDPE previamente desinfectado con etanol 70 % (Saira et al., 2022) y se cultivaron en aerobiosis durante 90 días. La utilización del polímero como fuente de carbono se evaluó cada 30 días, para lo cual los fragmentos de LDPE se observaron para registrar el crecimiento y color del micelio de los hongos filamentosos. Transcurridos 90 días los hongos filamentosos se aislaron en agar sales minerales con 0,1 % de LDPE en polvo y aquellos que desarrollaron colonias o mostraron viabilidad se consideraron

degradadores de LDPE. Asimismo se realizaron observaciones bajo el microscopio estereoscópico de los fragmentos de LDPE colonizados por los hongos (Rüthi et al., 2023).

La identificación del género de los hongos filamentosos degradadores de LDPE se basó en la morfología macroscópica y microscópica determinada en cultivos monospóricos (Arispe et al., 2022). Las observaciones macroscópicas correspondieron al color de las colonias y las microscópicas al tipo de hifas y forma de estructuras reproductoras (Pitt y Hocking, 2009; Barnett y Hunter., 1998).

2.4.2 Selección de hongos degradadores con base a la biomasa formada en LDPE en polvo como fuente de carbono, Lambayeque 2023

Los hongos capaces de utilizar el LDPE en polvo como fuente de carbono se seleccionaron con base a la biomasa micelial formada (Mostajo y Ambur, 2022). El LPDE en polvo se esterilizó por exposición a luz ultravioleta (254 nm) por 1 hora. Para la obtención del inóculo sobre los hongos cultivados en agar sales minerales con 0,1 % de LDPE en polvo, a 30°C durante 10 días, se adicionaron 10 mL de agua destilada, los conidios se cosecharon con el ansa bacteriológica, se depositaron en 40 mL de agua destilada con 1% de Tween y la concentración se estandarizó a 10^{5} conidios mL^{-1} mediante el recuento de células con la cámara de Neubauer.

El ensayo de biodegradación se realizó por duplicado en tubos con 10 mL de caldo sales minerales con 0,1 % de LDPE en polvo y 10 mL de caldo sales minerales con 0,1 % de glucosa (control positivo), en los cuales se depositaron 0,5 mL del inóculo fúngico (5 %) y se incubaron a 30°C durante 30 días. Transcurrida la incubación el caldo cultivado se esterilizó en autoclave (121 °C por 20 minutos), se filtró para separar la biomasa que se deshidrató a 60 °C durante 2 horas y se pesó en una balanza digital. La investigación se continuó con los tres hongos degradadores que alcanzaron la mayor biomasa.

2.4.3 Comparación de la eficiencia en la degradación de microplásticos de LDPE por cuatro consorcios de hongos

Los tres hongos seleccionados (B1, B2, B3) fueron cultivados de forma independiente en caldo mínimo sales con LDPE en polvo como fuente de carbono para obtener el inóculo fúngico. Los consorcios (C) fueron cuatro, constituidos por combinaciones de los tres hongos seleccionados y se consideró un control no inoculado (Tabla 1). Los hongos seleccionados se cultivaron en 20 mL de caldo sales minerales en 0,1 % de LDPE en polvo, a 30 °C durante 10 días. El inóculo mixto de los consorcios estuvo constituido por una mezcla de 1,5 mL de cada uno de los dos hongos constituyentes (consorcios 1,2,3) y 1 mL de cada uno de los tres constituyentes (consorcio 4).

En frascos con 97 mL de caldo sales minerales con 0,004 g de microplásticos de polietileno de baja densidad de LDPE (fragmentos de bolsa de 1 x 5 mm), se depositó 3 % del inóculo de los hongos en forma independiente o de los consorcios fúngicos correspondientes. Transcurrida la incubación en condiciones estáticas a 30 °C durante 90 días, el caldo se filtró para retener los microplásticos, los cuales fueron lavados con dodecilsulfato de sodio (SDS) 2% (p/v) para lisar las células remanentes, se enjuagaron con agua destilada por dos veces consecutivas y se deshidrataron a 60 °C durante 2 horas para determinar el peso constante (Sanchez – Purihuamán et al., 2025).

La eficiencia en la degradación de microplásticos de LDPE por los consorcios de hongos filamentosos se estimó con las variaciones en las características físicas (peso) y características mecánicas (resistencia a la tracción, TS). La eficiencia en la reducción del peso se determinó por la diferencia entre el peso inicial y el peso final. Con el peso perdido (%) se calculó la tasa de reducción (mg $día^{-1}$) y la vida media residual (días). Asimismo, la eficiencia de la reducción en la resistencia a la tracción (MPa) se estimó por comparación con el control no biodegradado (Sanchez – Purihuamán et al., 2025; Sathiyabama et al., 2024).

2.5 Procesamiento y análisis de datos

Con los valores del peso perdido y reducción de la resistencia a la tracción del LDPE, se realizó el análisis de varianza de una vía (ANOVA) y la prueba de comparaciones múltiples de Tukey para determinar las diferencias entre los tratamientos y la significancia entre ellos, respectivamente. El análisis estadístico se realizó con el software SPSS 22.00 para Windows. (Hernández et al., 2014).

CAPITULO III. RESULTADOS

3.1 Género de hongos filamentosos degradadores de LDPE aislados e identificados en el botadero de residuos sólidos Pampas de Reque, Lambayeque 2023

En el 77,78 % de las muestras de suelo y fragmentos de plástico deteriorado cuyos microorganismos fueron enriquecidos durante 60 días se aislaron 42 hongos que desarrollaron en agar sales minerales con microplásticos de LDPE como fuente de carbono durante 12 días (Figuras 1,2). Las 42 colonias de los hongos desarrollados se agruparon en 11 morfotipos, entre los cuales el predominante fue el 6 seguido del 4 y 3 (Tablas 2,3).

Transcurridos los 30 días de incubación con el 48 % de los hongos se observó micelio sobre el fragmento de LDPE; a los 60 días con el 55 % y a los 90 días con el 60 % de los hongos (Figura 3). A los 90 días en los fragmentos se observaron hifas y estructuras de reproducción adheridos a la superficie y a los bordes (Figura 4), así como también 17 hongos (40,52 %), demostraron viabilidad debido a que formaron colonias durante el reaislamiento (Figura 5) y se calificaron como degradadores de LDPE (Tabla 4).

Los hongos degradadores de LDPE se identificaron en los géneros Fusarium (29,4 %), Cunninghamella (23,5 %), Memnoniella (17,6 %), Alternaria (11,8 %), Aspergillus (11,8 %) y Stachybotry*s* (5,9 %). El género Fusarium alcanzó la mayor frecuencia de 29,4 % (Figuras 6 a 13, tabla 5).

Figura 1

Hongos filamentosos aislados del suelo y plásticos del botadero de residuos sólidos “Pampas de Reque”, Lambayeque 2023.

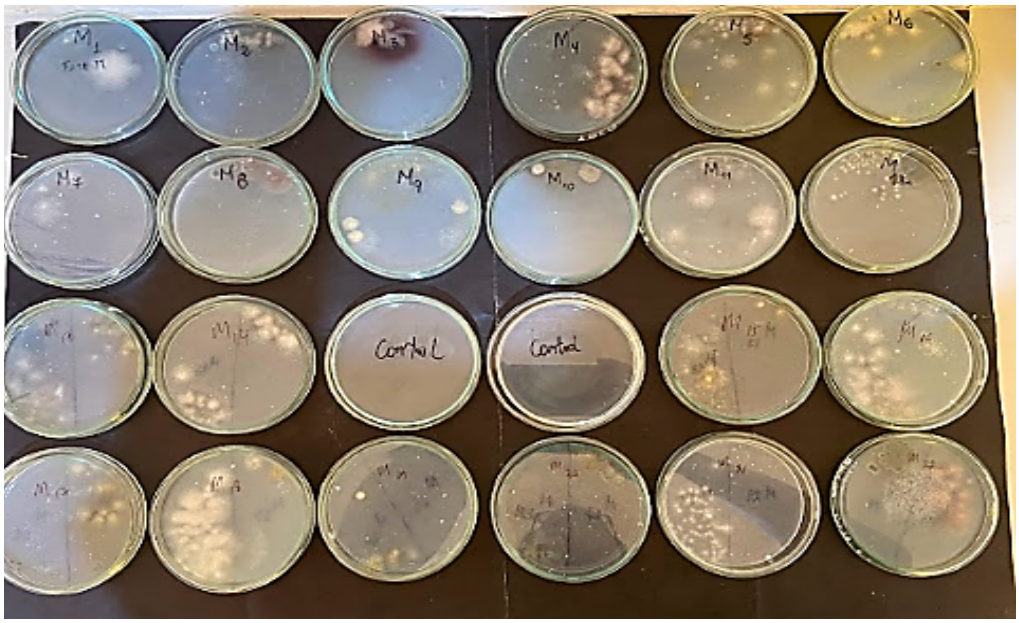


Figura 2

Morfotipo 10 de colonia de hongo filamentoso desarrollado en agar sales minerales con LDPE como fuente de carbono, Lambayeque 2023.

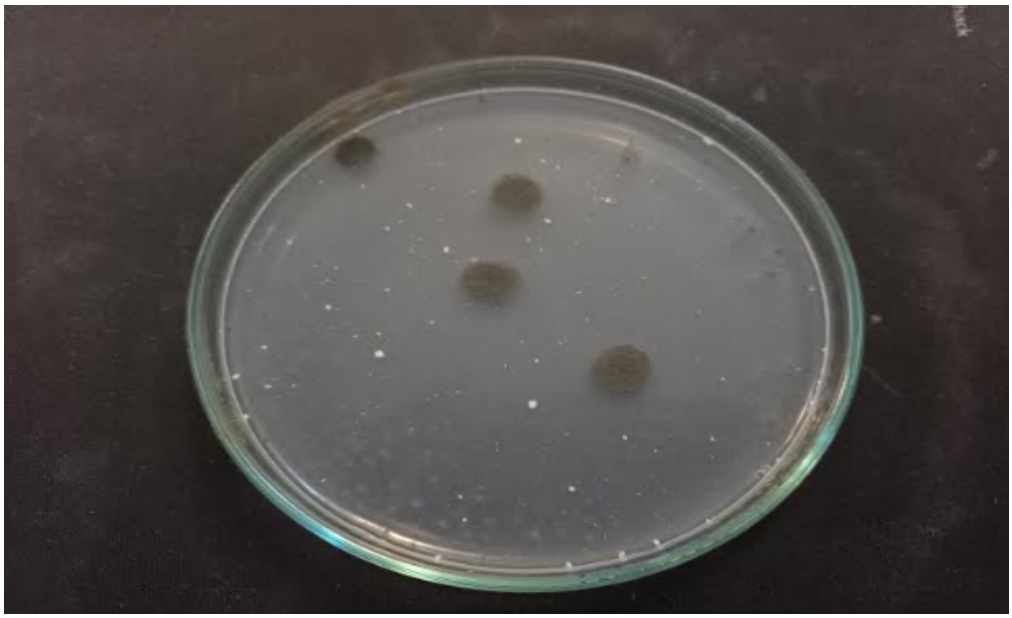


Tabla 2

Características macroscópicas de los morfotipos de colonias de hongos filamentosos aislados del botadero de residuos sólidos "Pampas de Reque", Lambayeque 2023

Morfotipo	Características de las colonias					
	Forma	Color anverso	Color reverso	Elevación	Textura	Borde
1	Circular	Rosa	Rosa	Convexa	Aterciopelada	Crenado
2	Circular	Lila	Lila	Aplanada	Granular	Entero
3	Circular	Rojo	Rojo	Aplanada	Algodonosa	Crenado
4	Circular	Verde	Verde	Convexa	Grumos	Entero
5	Circular	Verde	Verde	Convexa	Aterciopelada	Crenado
6	Circular	Verde	Verde	Convexa	Aterciopelada	Creando
7	Irregular	Verde	Verde	Aplanada	De moho	Entero
8	Irregular	Verde	Verde	Aplanada	De moho	Entero
9	Circular	Gris	Gris	Aplanada	Algodonosa	Creando
10	Circular	Verde	Verde	Aplanada	Algodonosa	Creando
11	Circular	Lila	Lila	Convexa	Aterciopelada	Crenado

Tabla 3

Frecuencia de los morfotipos de colonias de hongos filamentosos aislados de suelo y fragmentos de plásticos cultivados en agar sales minerales con microplásticos de LDPE, Lambayeque 2023

Morfotipo Código	Número de cultivos puros	Muestra de procedencia	Frecuencia %
6	8	4, 9, 15, 17, 42, 47,50, 53	19,05
4	7	12, 30, 40,43, 46, 48, 51	16,67
3	6	2, 24, 28, 36, 39,41	14,29
5	5	22, 13, 32, 45, 52	11,90
2	4	6, 23, 29, 37	9,52
7	4	10, 14, 49, 38	9,52
1	3	26, 31, 35	7,14
8	2	18, 21	4,76
9	1	11	2,38
10	1	8	2,38
11	1	5	2,38

Figura 3

Micelio oscuro y claro de hongos filamentosos desarrollados por 30 días (a), 60 días (b) y 90 días (c) en caldo sales minerales con un fragmento de LDPE.

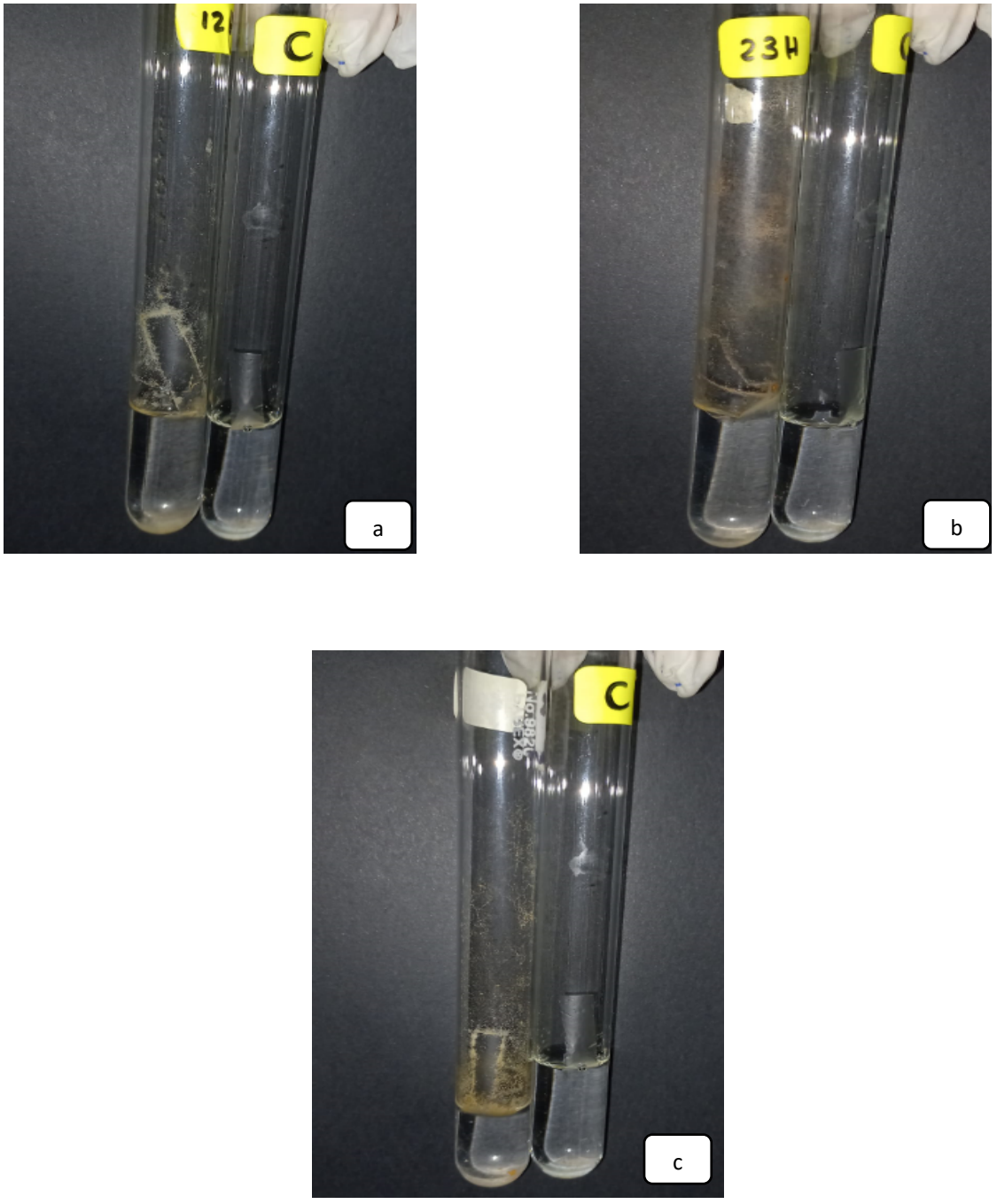


Figura 4

Observaciones microscópicas de micelio y estructuras reproductivas en fragmentos de LDPE colonizados por hongos degradadores, Lambayeque 2023.

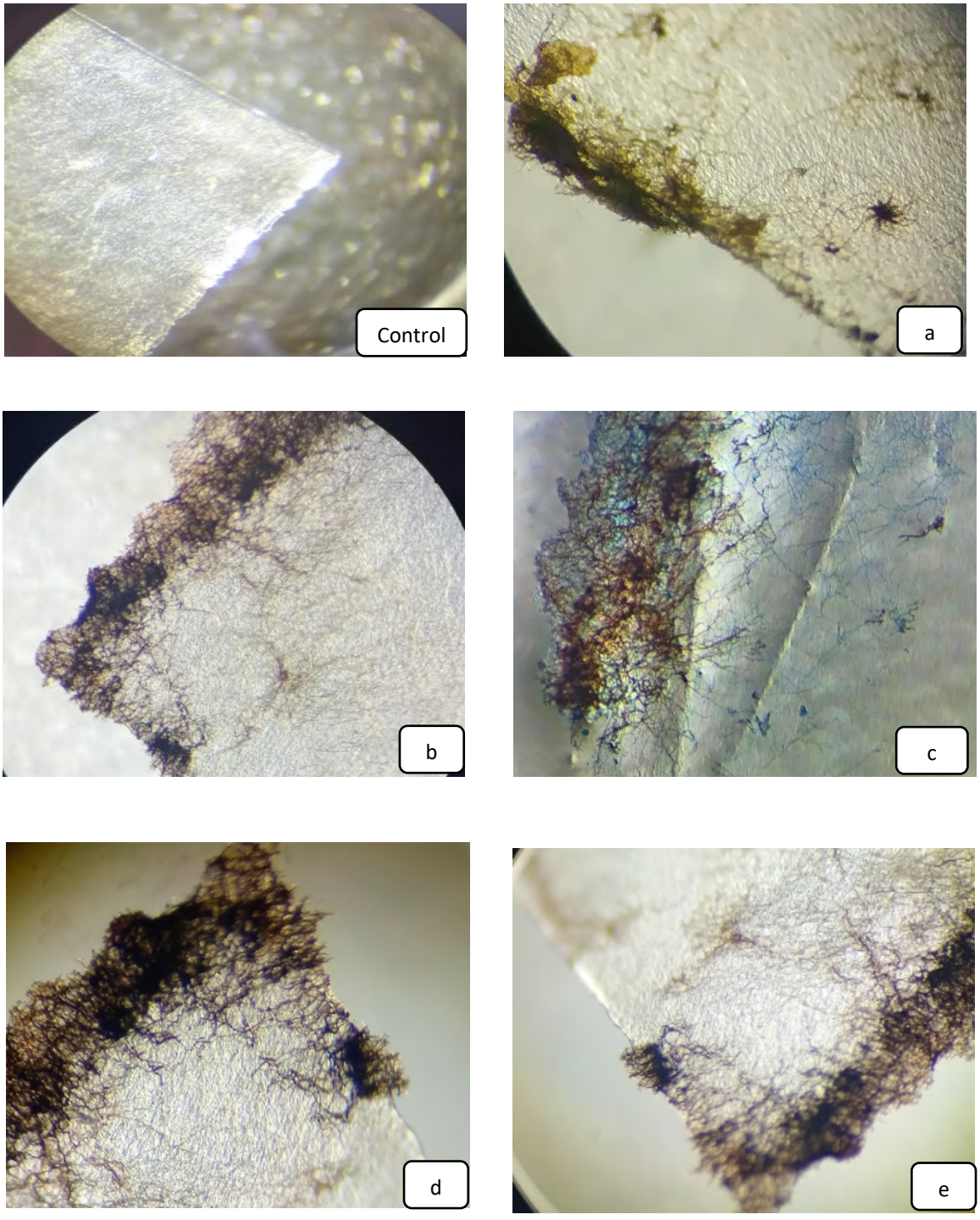


Figura 5

Hongos degradadores de LDPE reaislados en agar papa dextrosa, Lambayeque 2023.

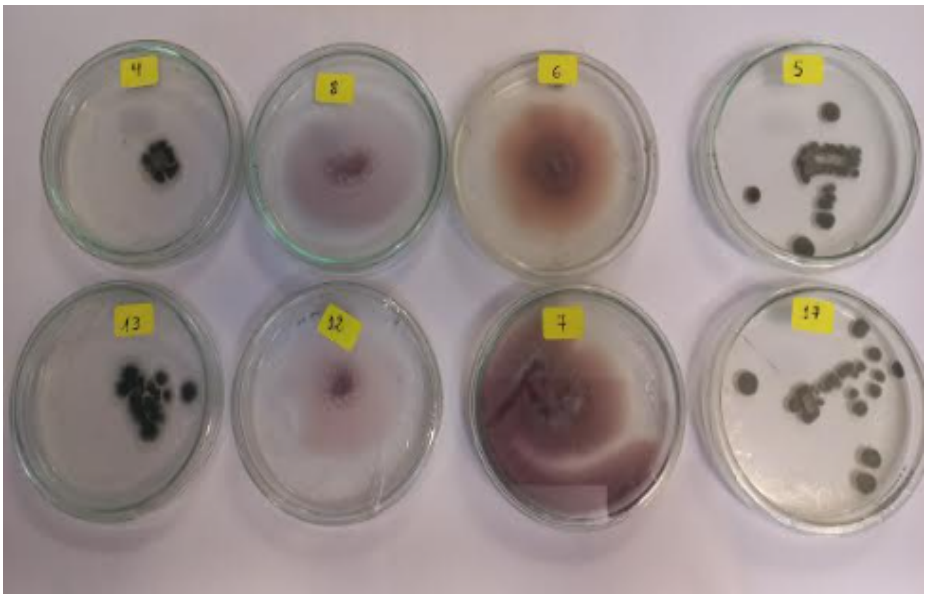


Tabla 4

Morfotipo de colonia y género de hongos calificados como degradadores de LDPE, Lambayeque 2023

Hongos degradadores de LDPE	Morfotipo de colonia	Género
1	6	*Fusarium*
2	4	*Fusarium*
3	3	*Fusarium*
4	12	*Fusarium*
5	15	*Fusarium*
6	5	*Cunninghamella*
7	2	*Cunninghamella*
8	7	*Cunninghamella*
9	14	*Cunninghamella*
10	1	*Memnoniella*
11	8	*Memnoniella*
12	16	*Memnoniella*
13	9	*Alternaria*
14	13	*Alternaria*
15	10	*Aspergillus*
16	17	*Aspergillus*
17	11	*Stachybotrys*

Figura 6

Colonia y observación microscópica (400x) de Fusarium sp. 6, Lambayeque 2023.

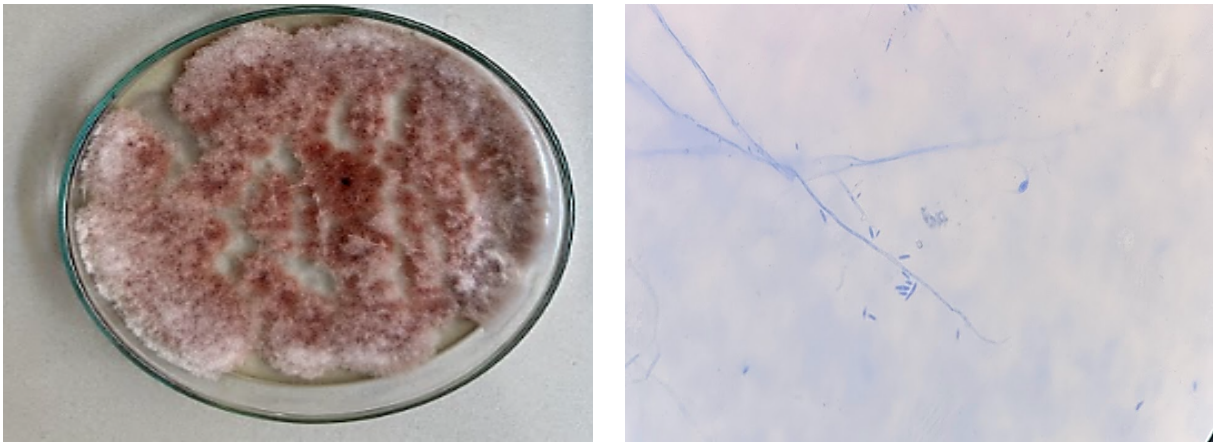


Figura 7

Colonia y observación microscópica (400x) de Fusarium sp. 4, *Lambayeque 2023.*

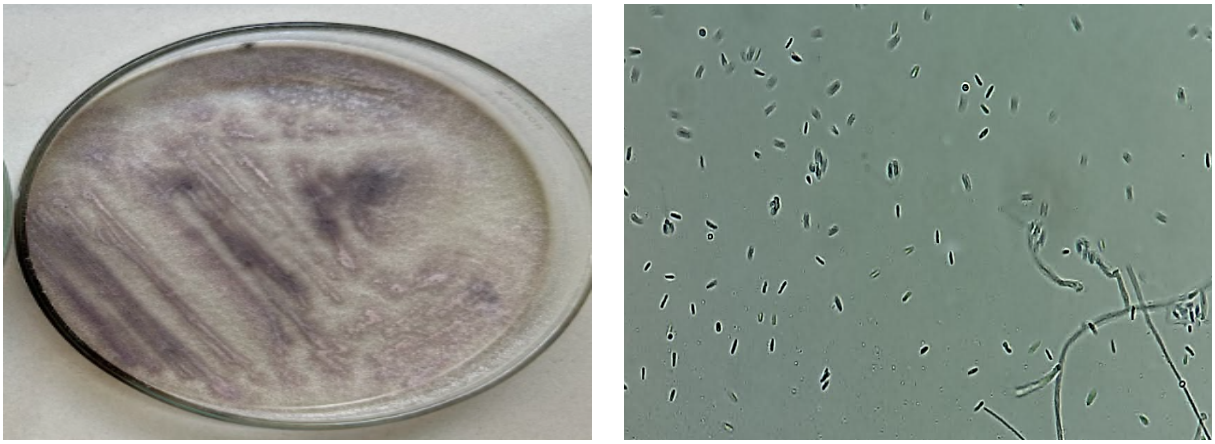


Figura 8

Colonia y observación microscópica (400x) de Fusarium sp. 5, *Lambayeque 2023*.

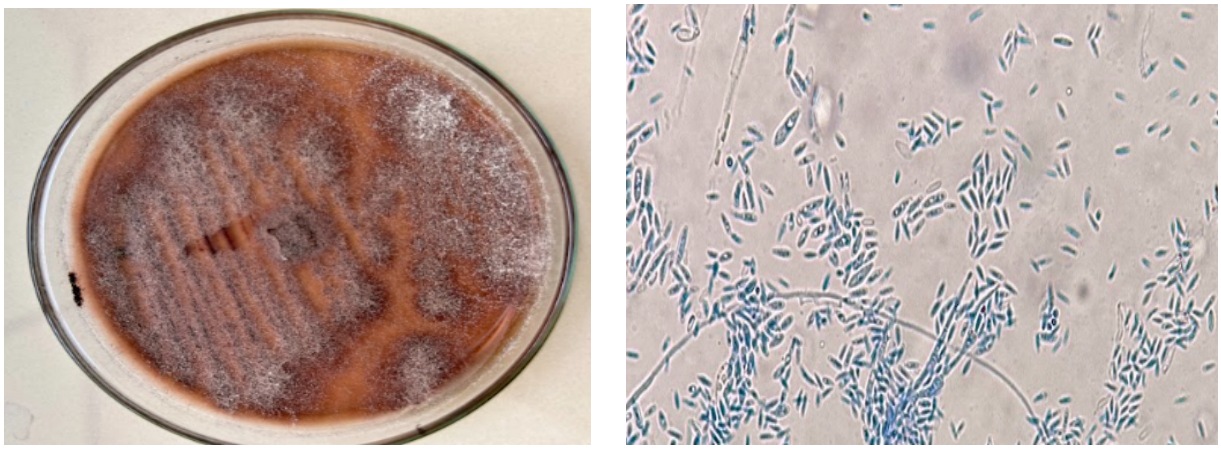


Figura 9

Colonia y observación microscópica (400x) de Alternaria sp. 3, *Lambayeque 2023.*



Figura 10

Colonia y observación microscópica (400x) de Cunninghamella sp. 2, *Lambayeque 2023*.

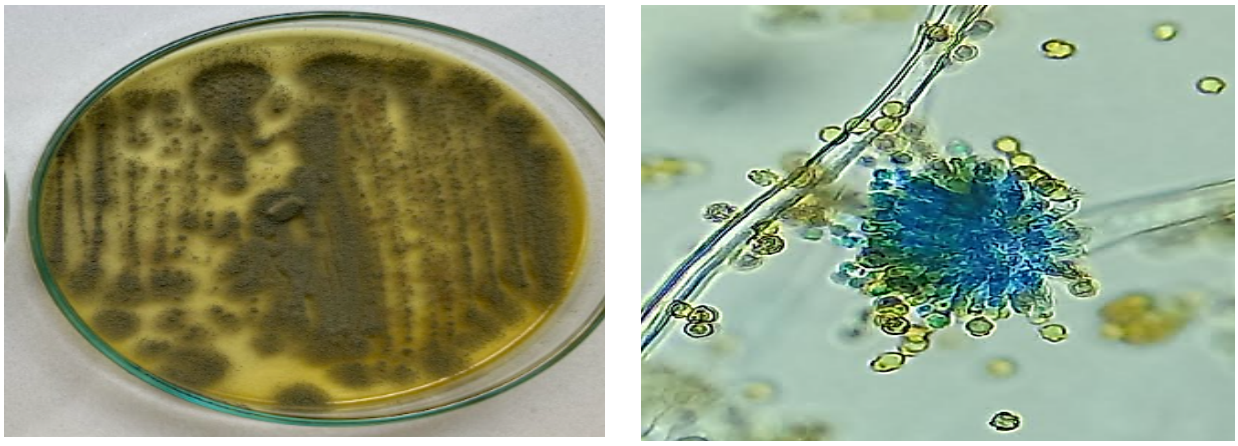


Figura 11

Colonia y observación microscópica (400x) de Aspergillus sp. 10, Lambayeque 2023.

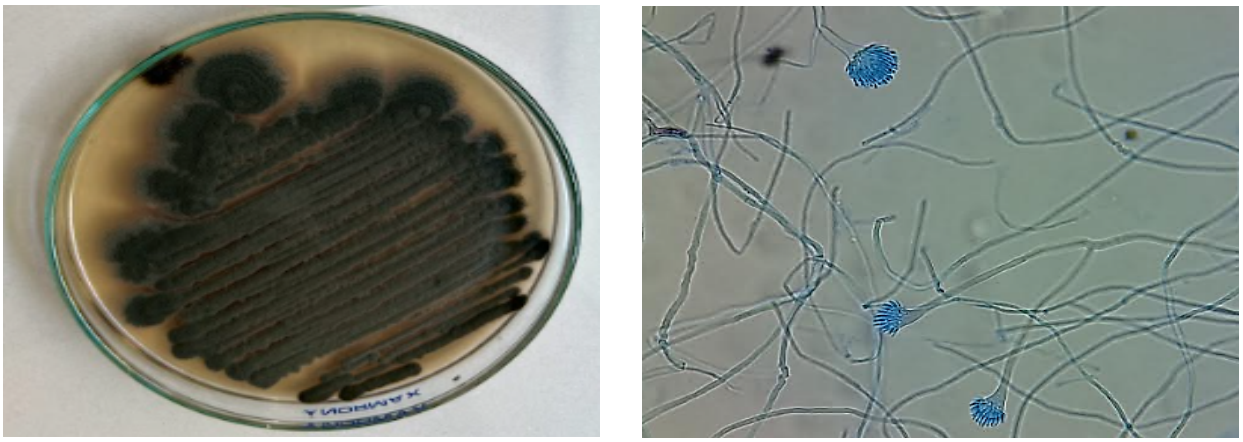
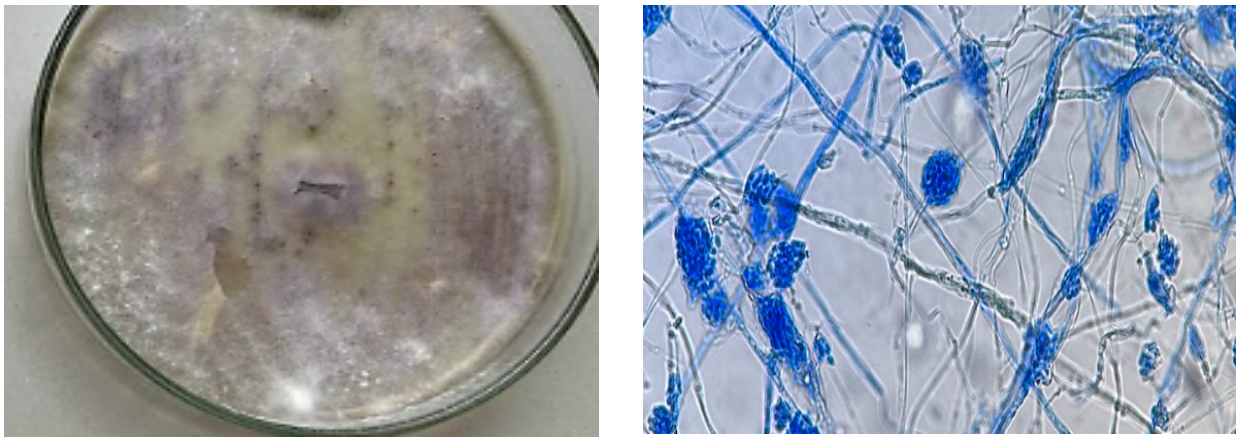


Figura 12

Colonia y observación microscópica (400x) de Stachybotrys sp. 11, Lambayeque 2023



.

Figura 13

Colonia de *Memnoniella* sp. 8 en agar papa dextrosa, Lambayeque 2023.

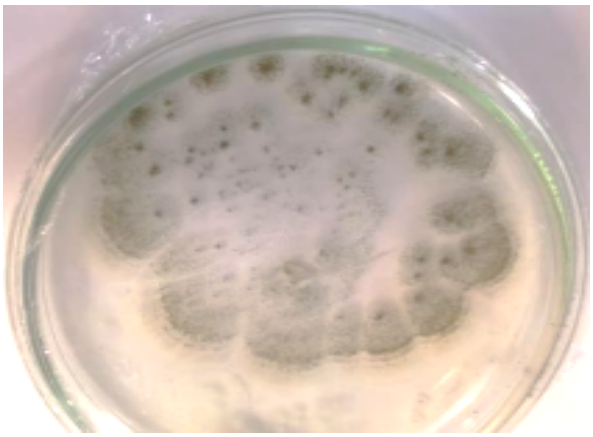


Tabla 5

Frecuencia de géneros de hongos degradadores de LDPE aislados del botadero de residuos sólidos "Pampas de Reque", Lambayeque 2023

Géneros	Morfotipos de colonias	Frecuencia de aislamiento (%)
Fusarium	6, 4, 3, 12, 15	29, 4
Cunninghamella	5, 2, 7, 14	23, 5
Memnoniella	1,8, 16	17,6
Alternaria	9, 13	11,8
Aspergillus	10, 17	11,8
Stachybotrys	11	5,9

3.2 Hongos degradadores seleccionados según la biomasa formada en LDPE en polvo como fuente de carbono, Lambayeque 2023

Todos los hongos degradadores de LDPE desarrollaron micelio en el caldo sales minerales con LDPE en polvo como fuente de carbono durante 30 días (Figuras 14 a 17, anexo 2). La biomasa fúngica osciló entre 0,10 – 0,63 g en LDPE y 0,40 – 0,65 g en glucosa como fuente de carbono (Figura 18, anexo 2). La biomasa formada por el 47,05 % de los hongos filamentosos correspondió a más del 50 % de la biomasa del control glucosa (Tabla 6). Los hongos *Alternaria* sp. 3 (98,2 %), *Fusarium* sp. 6 (96,9 %) y *Memnoniella* sp. 8 (96,7 %) alcanzaron los mayores valores en la biomasa, por lo que se seleccionaron para continuar la investigación (Tabla 7).

3.3 Comparación de la eficiencia en la degradación de microplásticos de LDPE por cuatro consorcios de hongos

La eficiencia en la degradación de microplásticos de LDPE correspondió al peso perdido, tasa de reducción, vida media residual y reducción de la resistencia a la tracción del polímero degradado. El peso perdido del LDPE degradado por tres de los cuatro consorcios fúngicos durante 90 días fue de 13,7 – 17,4 % en comparación con 8,1 – 12,8 % de los tres hongos en forma individual (Tablas 8,9, anexo 3). La tasa de reducción del LDPE fue 1,650 – 2,204 mg día^{-1} y la vida media residual de 314,47 – 420,06 días en el LDPE degradado por tres de los cuatro consorcios en comparación con 0,937 – 1,521 mg día^{-1} y 455,68 – 739,70 mg día^{-1} con los hongos en forma independiente. Asimismo, la reducción de la resistencia a la tracción en el LDPE degradado por tres de los cuatro consorcios fúngicos fue de 44,59 – 58,14 % frente a 30,33 – 39,53 % con los tres hongos en forma individual. En este contexto, la eficiencia en la degradación de microplásticos de LDPE por los consorcios 1 (*Alternaria* sp. 3 + *Fusarium* sp. 6), consorcio 3 (*Alternaria* sp. 3 + *Memnoniella* sp. 8) y consorcio 4 (*Alternaria* sp. 3 + *Fusarium* sp. 6 + *Memnoniella* sp. 8) pero no con el consorcio 2 (*Fusarium* sp. 6 + *Memnoniella* sp. 8) superó a la eficiencia de los tres hongos en forma individual *Alternaria* sp. 3 (T1), *Fusarium* sp. 6 (T2) y *Memnoniella* sp. 8 (T3).

Figura 14

Fusarium sp. 6 (a) y Fusarium sp. 4 (b) cultivados en caldo mínimo sales con glucosa y LDPE como fuente de carbono, Lambayeque 2023.

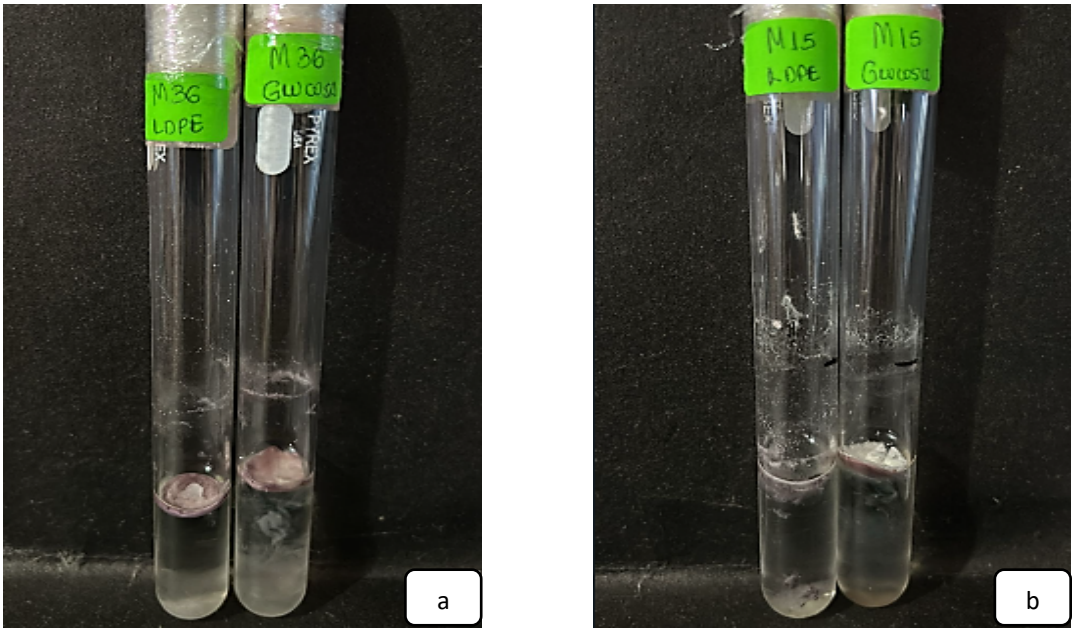


Figura 15

Fusarium sp. 5 (a) y Alternaria sp. 3 (b) cultivados en caldo mínimo sales con glucosa y LDPE como fuente de carbono, Lambayeque 2023.

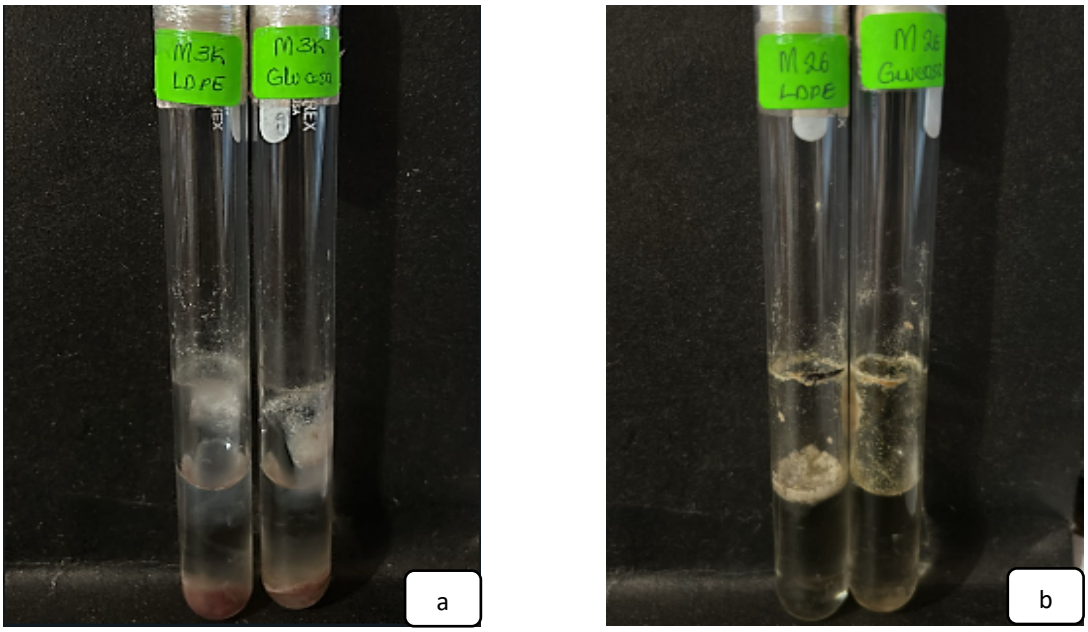


Figura 16

Cunninghamella sp. 2 (a) y Memnoniella sp. 8 (b) cultivados en caldo mínimo sales con glucosa y LDPE como fuente de carbono, Lambayeque 2023.

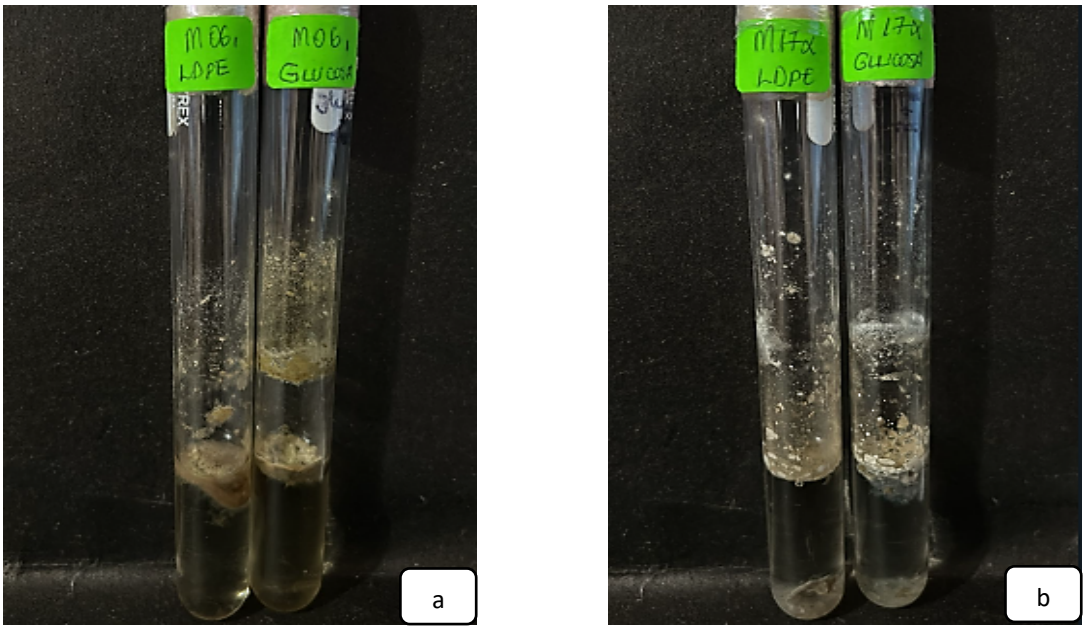


Figura 17

Aspergillus sp. 10 (a) y Stachybotrys sp. 11 (b) cultivados en caldo mínimo sales con glucosa y LDPE como fuente de carbono, Lambayeque 2023.

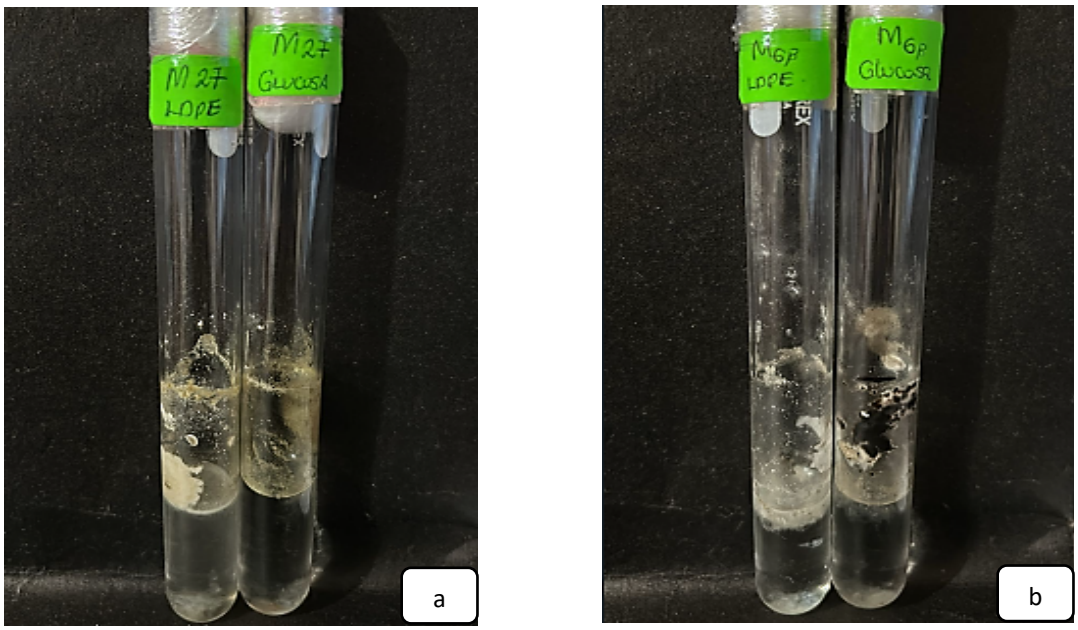


Figura 18

Biomasa en fresco de hongos degradadores desarrollados en caldo mínimo sales con LDPE como fuente de carbono, Lambayeque 2023.

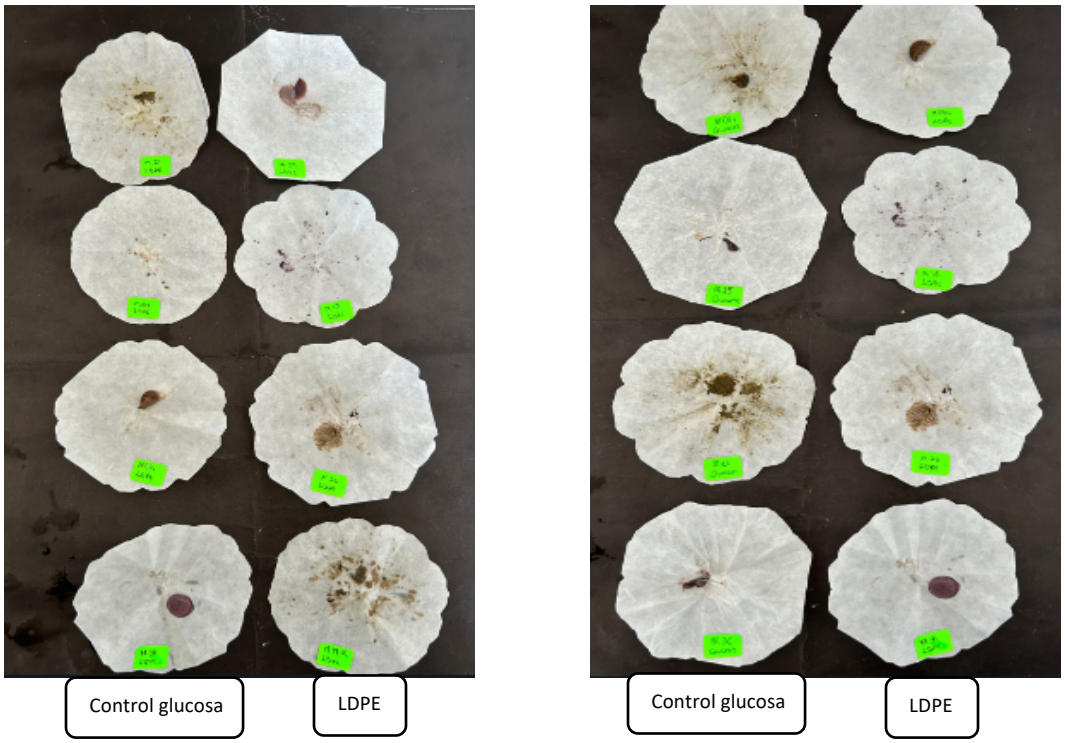


Tabla 6

Rango en la biomasa formada por hongos filamentosos en LDPE como fuente de carbono, Lambayeque 2023

Hongos degradadores		Biomasa respecto al control glucosa (%)
N°	%	
5	29,4	1 - 25
4	23,5	26 – 50
2	11,8	51 - 75
6	35,2	76 - 100

*Biomasa formada con 10 ml de caldo sales minerales.

Tabla 7

Biomasa formada con LDPE y glucosa como fuentes de carbono por los hongos degradadores seleccionados, Lambayeque 2023

Hongos filamentosos	Biomasa formada (g)		Biomasa respecto al control %
	Glucosa	LDPE	
Alternaria sp. 3	0,56	0,55	98,2
Fusarium sp. 6	0,65	0,63	96,9
Memnoniella sp. 8	0,60	0,58	96,7
Stachybotrys sp. 11	0,63	0,60	95,2
Cunninghamella sp. 2	0,60	0,57	95,0
Fusarium sp. 5	0,61	0,57	93,4
Fusarium sp. 4	0,58	0,54	93,1
Aspergillus sp. 10	0,57	0,47	82,4

Tabla 8

Prueba de comparaciones múltiples de Tukey del peso perdido por los microplásticos de LDPE degradados por consorcios de hongos durante 90 días

Tratamientos	Peso (g)		Peso perdido %	Significancia
	Inicial	Final		
T1 *Alternaria* sp. 3	0,0172	0,0150	12,8	b
T2 *Fusarium* sp. 6	0,0173	0,0159	8,1	c
T3 *Memnoniella* sp. 8	0,0170	0,0154	9,4	c
T4 Consorcio 1 (*Alternaria* sp. 3 + *Fusarium* sp. 6)	0,0175	0,0151	13,7	b
T5 Consorcio 2 (*Fusarium* sp. 6 + *Memnoniella* sp. 8)	0,0176	0,0163	7,4	c
T6 Consorcio 3 (*Alternaria* sp. 3 + *Memnoniella* sp. 8)	0,0172	0,0142	17,4	a
T7 Consorcio 4 (*Alternaria* sp. 3 + *Fusarium* sp. 6 + *Memnoniella* sp. 8)	0,0173	0,0147	15,0	b

*Promedio de tres repeticiones

Tabla 9

Tasa de reducción, vida media y resistencia a la tracción de microplásticos de LDPE degradados por consorcios de hongos filamentosos

Tratamientos	Tasa de reducción (mg día^{-1})	Vida residual (días)	Resistencia a la tracción		
			MPa	Reducción (%)	Significancia
T1 *Alternaria* sp. 3	1,521	455,68	12,75	39,53	c
T2 *Fusarium* sp. 6	0,937	739,70	14,22	36,56	c
T3 *Memnoniella* sp. 8	1,108	625,54	14,71	30,23	d
T4 Consorcio 1 (*Alternaria* sp. 3 + *Fusarium* sp. 6)	1,650	420,06	11,77	44,59	b
T5 Consorcio 2 (*Fusarium* sp. 6 + *Memnoniella* sp. 8)	0,853	812,54	15,69	25,58	d
T6 Consorcio 3 (*Alternaria* sp. 3 + *Memnoniella* sp. 8)	2,204	314,47	8,83	58,14	a
T7 Consorcio 4 (*Alternaria* sp. 3 + *Fusarium* sp. 6 + *Memnoniella* sp. 8)	1,818	381,24	11,28	46, 51	b

*Promedio de tres repeticiones.

La prueba de comparaciones múltiples de Tukey demostró que la mayor eficiencia en la degradación de microplásticos de LDPE expresada como peso perdido (17,4 %) y reducción en la fuerza de tracción de LDPE (58,14 %) se alcanzó con el consorcio 3, con diferencias significativas frente a los demás tratamientos (Tablas 8, 9, anexo 4). Asimismo, la mayor tasa de reducción (2, 204 mg día^{-1}) y la menor vida residual del polímero (314,47 días) correspondió al consorcio 3 (Tabla 9).

CAPITULO IV. DISCUSIÓN

La búsqueda de hongos con potencial para la degradación del LDPE en el suelo contaminado con plásticos de un botadero coincide con Sutkar et al. (2025), Gong et al. (2023) y Chigwada et al. (2023). Los botaderos son hábitats ´potenciales para la exploración de microorganismos con capacidad para degradar contaminantes como los plásticos (Amaral-Zettler et al., 2020). En los botaderos los residuos orgánicos se degradan en forma no controlada, sobreviven los microrganismos capaces de formar estructuras de resistencia, biopelículas, biosurfactantes y con metabolismo versátil, que adaptan su sistema enzimático para metabolizar un amplio rango de sustratos de difícil oxidación como el LDPE (Ogu et al., 2024).

El micelio observado por el crecimiento de los hongos filamentosos en medio mineral con un fragmento de LDPE como única fuente de carbono evidenció la degradación del polímero, consistente con los reportes previos de Yang et al. (2024), Gong et al. (2023) y Khruengsai et al. (2021). El tiempo requerido para la observación del micelio en los fragmentos de LDPE fue de 30 días; no obstante, se ha reportado su visualización a los 7 días (Sathiyabama et al., 2024), 15 días (Saxena et al., 2022), 30 y 90 días (Khruengsai et al., 2021). En la biodegradación del LDPE se diferencian cuatro etapas: colonización-biodeterioración, biofragmentación-depolimerización, asimilación y mineralización (Mishra et al., 2022). El micelio observado sobre los fragmentos de LDPE evidenció la colonización del polímero. La adhesión de las hifas a la superficie hidrofóbica es favorecida por la secreción de proteínas especializadas denominadas hidrofobinas (Puliga et al., 2023). Los compuestos extracelulares, en forma mayoritaria carbohidratos secretados generan una matriz que alberga las estructuras microbianas y se forma la biopelícula (Khan et al., 2022).

La biodegradación del LPDE depende de la formación de la biopelícula, donde los microorganismos y las enzimas secretadas en la superficie del polímero lo deterioran y fragmentan a oligómeros de bajo peso molecular, que a su vez por acción enzimática son metabolizados, asimilados y mineralizados (Sheik et al., 2025). En este contexto, la observación del micelio colonizador de los fragmentos de LDPE y la viabilidad de los hongos después del cultivo con

LDPE como única fuente de carbono durante 60 días, fueron las características utilizadas para calificar a los hongos como degradadores de LDPE, al igual que en la investigación de Sánchez-Purihuamán et al. (2025).

El porcentaje (40,5 %) de hongos calificados como degradadores de LDPE superó a 2,4 % reportado por Kunlere et al. (2019) en hongos aislados de plásticos deteriorados en un vertedero y 26,15 % registrado por Khruengsai et al. (2021) con hongos de una colección; sin embargo, el valor fue inferior a 46,75 % reportado por Sánchez-Purihuamán et al. (2025) con hongos aislados del suelo contaminado de un botadero. Esta superioridad se atribuye a que los investigadores citados aislaron un mayor número de hongos (77), a diferencia de los 42 aislados en la presente investigación. Los hongos degradadores de LDPE fueron aislados del suelo contaminado con plásticos deteriorados en un botadero; no obstante, pueden ser obtenidos del interior de los tejidos vegetales (Sheik et al., 2015), compost, lodos activados (Kulié et al., 2023), sedimentos marinos (Sayed et al., 2025), agua contaminada (Ali et al., 2022) y rizósfera (Mohy et al., 2022).

Los géneros de hongos filamentosos degradadores de LDPE identificados en la presente investigación fueron reportados previamente por Febria et al. (2024), Saxena et al. (2022), Yang et al. (2024), Gong et al. (2023), Arshad et al. (2025) y Saxena et al. (2021), en lo correspondiente a *Fusarium, Memnoniella, Alternaria, Aspergillus, Cunninghamella* y *Stachybotris*, respectivamente. Respecto a la predominancia de *Fusarium* spp. entre los hongos degradadores de LDPE, se alinea con estudios que demostraron la degradación del polímero como Munir et al. (2024) con *F. solani*; Ali et al. (2022) con *F. equiseti* y Spina et al. (2021) con *F. oxysporum*.

El micelio formado en el LDPE en polvo como única fuente de carbono durante 30 días fue evidencia de la utilización del polímero para sustentar el crecimiento (Ojha et al., 2017), al igual que en el reporte de Sánchez-Purihuaman et al. (2025). El rango de biomasa (0,100-0,630 g) fue superior al rango de 0,001-0,028 g reportado por Damian y Paredes (2026) con hongos degradadores aislados de estiércol de vacuno, superioridad que puede ser explicada por la temperatura de incubación de 30 y 25 °C. respectivamente.

El peso perdido (7,4-17,4 %) en el LDPE biodegradado durante 90 días por los hongos en forma individual fue superior al rango 3,80-12,98 % reportado por Kuswytasari et al. (2023), Mostajo y Ambur (2022) y El Sayed et al. (2021); sin embargo, es inferior al rango de 19,40-47,00 % registrado por Ogu et al. (2024), Aguiar et al. (2024) y Mohy et al. (2022). La superioridad es explicada por una mayor temperatura de incubación (35-37 °C) o la adición de nitrógeno como fuente externa (Mohy et al., 2022).

La reducción del peso del LDPE degradado por tres de los cuatro consorcios fúngicos (a excepción de uno) fue de 13,7-17,4 % superior a 8,1-12,8 % de los hongos en forma independiente, acorde con los reportes de DSousa et al. (2021), Kunlere et al. (2019) e Idowu et al. (2019). La superioridad de los consorcios fúngicos en la degradación del LDPE se atribuye a la actividad sinérgica de los microorganismos, al igual que lo reportaron Arshad et al. (2025) e Idowu et al. (2019). La actividad sinérgica de los consorcios microbianos no solo facilita la transformación de la estructura y composición química del LDPE, sino que también promueve el crecimiento del micelio y por tanto acelera el proceso degradativo (Arshad et al., 2025).

El peso perdido (7,2 %) en el LDPE degradado por el consorcio fúngico 2 (*Fusarium* sp. 6 + *Memnoniella* sp. 8) fue menor al valor alcanzado por cada uno de los hongos inoculados en forma independiente (8,1 y 9,4 % respectivamente), resultado que evidencia antagonismo entre los microorganismos, al igual que el reporte de Yang et al. (2024) y Cabeza – Vásquez et al. (2025), con hongos y bacterias degradadoras de LDPE. Los investigadores concluyeron que en los consorcios microbianos se evidencian interacciones sinérgicas que benefician la actividad degradadora de LDPE, pero también se observa antagonismo que impacta de forma negativa la actividad microbiana. Al respecto Yang et al. (2024) determinaron que después de 30 días, el peso del LDPE perdido durante la biodegradación del LDPE fue de 0,36 ± 0,15 % (*Alternaria angustiovoidea*); 0,30 ± 0,06 % (*Cladosporium basi- inflatum*) y 0,37 ± 0,11 % (*Trametes hirsuta*), valores que se incrementaron en forma no significativa a 0,37 ± 0,05 % (*A. angustiovoidea* + *C. basi- inflatum*); 0,31 ± 0,01 % (*C. basi- inflatum* +

T. hirsuta), e inclusive disminuyeron a 0,26 ± 0,11 % (*A. angustiovoidea* + *T. hirsuta*).

La pérdida de peso del LDPE es proporcional al área superficial biodegradada (Anuradha y Sivasakthivelan, 2016) y depende del tiempo (Sayed, 2025), pH y temperatura (Gonzales, 2020), agitación constante durante la incubación (Sutkar et al., 2025), adición de nitrógeno (Mohy et al., 2022), tamaño del plástico (Aguiar et al., 2024) y pretratamiento del polímero (Khan et al., 2022). En general, la pérdida de peso del LDPE degradado por hongos en forma individual o por consorcios fúngicos presenta un rango muy amplio y contradictorio, que va desde 3,80 % con *A. carbonarius* durante 112 días, con agitación constante de 120 rpm (Skariyyachan et al., 2021) a 34,35 % con *P. chysogenum* durante 90 días, en condiciones estáticas (Ojha et al., 2017). Asimismo, la reducción del peso puede ser influenciada por la biomasa residual remanente en el polímero o por el peso perdido debido a la volatilización de los compuestos intermediarios durante la degradación (Ho et al., 2018). En este contexto, la degradación del LDPE requiere la verificación mediante la evaluación de los cambios en las propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción entre otras (Saira et al., 2022).

La resistencia a la tracción o fuerza de tracción es la tensión máxima que un material puede soportar al ser estirado o traccionado antes de romperse o deformarse en forma permanente. La reducción de la fuerza de tracción de los fragmentos de LDPE degradados por los hongos en forma individual (30,23 - 39,53 %) y en consorcios (25,58 - 58,14 %) verificó la degradación del polímero, que está asociada con cambios en las propiedades físicas como la pérdida de peso, mecánicas como la resistencia a la tracción y químicas como nuevos grupos funcionales en la superficie (DSouza et al., 2021). La reducción en la resistencia a la tracción significa que el polímero se vuelve frágil por la deterioración causada por los microorganismos (Khruengsai et al., 2021).

En la presente investigación las variaciones en las características físicas (pérdida de peso) y mecánicas (resistencia a la tracción) verificaron la degradación del LDPE; no obstante, también se pueden caracterizar los cambios químicos en el polímero, mediante FTIR (Idowu et al., 2019), los compuestos intermediarios de la degradación mediante GC-MS (Khruengsai et al., 2021), la alteración física de la superficie mediante SEM (Anuradha y Sivasakthivelan, 2016) y se puede cuantificar el dióxido de carbono producto de la biodegradación (Khruengsai et al., 2021). Por limitaciones técnicas no se realizaron estas pruebas analíticas; sin embargo, se logró verificar la degradación del LDPE por los hongos en forma individual y en consorcios, por lo que presentan potencial para la biorremediación de ambientes contaminados con el polímero.

CONCLUSIONES

- Los hongos filamentosos degradadores de LDPE aislados del botadero de residuos sólidos “Pampas de Reque”, Chiclayo se identificaron en los géneros Fusarium (29,4 %), Cunninghamella (23,5 %), Memnoniella (17,6), Alternaria (11,8), Aspergillus (11,8 %) y Stachybotrys (5,9 %).
- Los hongos degradadores de LDPE seleccionados con base a la biomasa formado en el polímero en polvo con fuente de carbono fueron *Alternaria* sp. 3, *Fusarium* sp. 6 y *Memnoniella* sp. 8.
- La eficiencia en la degradación de microplásticos de LDPE por tres de los cuatro consorcios fúngicos superó a los hongos en forma individual. La mayor eficiencia expresada como peso perdido (17,4 %), tasa de reducción (2,204 mg día^{-1}), vida media residual (314,47 días) y reducción en la fuerza de tracción del LDPE (58,14 %) se alcanzó con el consorcio 3 constituido por *Alternaria* sp. 3 + *Memnoniella* sp. 8.

Los hongos filamentosos degradadores de LDPE aislados del botadero de residuos sólidos formaron biomasa con el polímero en polvo como única fuente de carbono. La eficiencia en la degradación de microplásticos de LDPE por tres de los cuatro consorcios fúngicos superó a los hongos en forma individual. La mayor eficiencia expresada como peso perdido (17,4 %) y reducción en la fuerza de tracción del LDPE (58,14 %) se alcanzó con el consorcio 3 constituido por *Alternaria* sp. 3 + *Memnoniella* sp. 8, por lo que se concluyó que estos hongos tienen potencial para la degradación del polímero contaminante.

RECOMENDACIONES

Identificar el nivel molecular de *Alternaria* sp. 3, *Fusarium* sp. 6 y *Memnoniella* sp. 8.

Investigar la actividad enzimática relacionada con la degradación del LDPE en *Alternaria* sp. 3, *Fusarium* sp. 6 y *Memnoniella* sp. 8.

Verificar la degradación del LDPE con el análisis de los cambios químicos en la estructura mediante FTIR.

REFERENCIAS

Aguiar, A., Gama, L., Fornari, M., Neto, A., de Souza, R., Perna, R., Castro, L., Kovacs, S., Simões, M. F., Ferreira, N., Domínguez, Y., de Castro, L., y Ottoni, C. (2024). Bioprospecting of mangrove filamentous fungi for the biodegradation of polyethylene microplastics. *Journal of marine science and engineering*, 12(9), 1629. https://doi.org/10.3390/jmse12091629

Al Nahian, S., Rakib, M. R. J., Kumar, R., Haider, S. M. B., Sharma, P., & Idris, A. M. (2023). Distribution, characteristics, and risk assessments analysis of microplastics in shore sediments and surface water of Moheshkhali channel of Bay of Bengal, Bangladesh. *Science of the Total Environment*, 855, 158892. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158892

Ali, S., Elsamahy, T., Al-Tohamy, R., Zhu, D., Mahmoud, Y., Koutra, E., Metwally, A., Kornaros, M., y Sun, J. (2021). Plastic wastes biodegradation: Mechanisms, challenges and future prospects. *The Science of the Total Environment*, *780*, 146590. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146590

Ali, S., Zakarya, S., & Khaled, S. (2022). Screening and optimisation of the biodegradation potential for low density polyethylene (LDPE) films by *Fusarium equiseti* and *Brevibacillus parabrevis*. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, *19*(1), 215–229. https://doi.org/10.13005/bbra/2980

Amaral – Zettler, L., Zettler. E., & Mincer. T. (2020). Ecology of the plastisphere. *Nature Reviews Microbiology*, 18. 139 -151. doi.org/10.1038./s41579-019-0308-0

Anuradha, S., & Sivasakthivelan, P. (2016). Scanning electron microscopic (SEM) analysis on the biodegradation of low density polyethylene (LDPE) by Bacillus cereus. International Journal of Current Research, 8(01), 25052-25055.

Andia Corahua, Y. G., & Perez Cabrejos, R. J. (2020). *Eficiencia de la degradación de fragmentos plástico de polietileno (PEBD) utilizando el hongo Aspergillus tubingensis en suelo agrícola, Lurín – 2020* (Tesis de grado, Universidad César Vallejo). Repositorio Institucional UCV. https://repositorio.ucv.edu.pe/

Arispe, A., Hernandez, E., Castro, L., Aguirre, E., Cerna., & Ochoa, Y. (2022). Fusarium species in maize grains and stems (*Zea mays L.*) from subsistence and commercial Systems. *Nova Scientia*, 15 (30), 1 – 23. doi.org/10.21640/ns.v15i30.3166.

Arshad, I., Sajid, S., Yu, Q., Li, J., Zveushe, O. K., Rehman, S., Lal, M. M., Atakpa, E. O., Chen, X., Zhang, W., Zhenzhen, L., Lei, Z., Bainian, Z., Dong, F., & Han, Y. (2025). Elucidating polyethylene and polypropylene microplastics degradation mechanisms and metabolic pathways via pectin-biochar mediated fungal consortia. *Journal Of Hazardous Materials*, *496*, 139217. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.139217

Awet, T., Kohl, Y., Meier, F., Straskraba, S., Grun, A., Ruf, T., Jost, C., Drexel, R., Tunc, E., y Emmerling, C. (2018). Efects of polystyrene nanoparticles on the microbiota and functional diversity of enzymes in soil. *Environment Sciences Europe*, *30* (1). https://doi.org/10.1186/s12302-018-0140-6

Bao, R., Pu, J., Xie, C., Mehmood, T., Chen, W., Gao, L., Lin, W., Su, Y., Lin, X., & Peng, L. (2022). Aging of biodegradable blended plastic generates microplastics and attached bacterial communities in air and aqueous environments. *Journal of Hazardous Materials*, *434*, 128891. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128891

Barnett, H. & Hunter, B. B (1998). *IIIlustrated genera of imperfect fungi* (4th ed.) APS, Press.

Brebu, M. (2020). Environmental degradation of plastic composites with natural fillers-A review. *Polymers*, *12*(1), 166. https://doi.org/10.3390/polym12010166

Cabeza–Vásquez, H., Reaño–Segundo, Y., Sánchez–Purihuamán, M., Barturen–Quispe, A., Caro–Castro, J., Vásquez–Llanos, S., Villanueva–Aguilar, C., & Carreño–Farfán, C. (2023). Low-density polyethylene (LDPE) degradation by consortia of *Chryseobacterium* sp. and *Methylorubrum* spp. isolated from a solid waste landfill. *Applied and Environmental Soil Science*, *9895980*. https://doi.org/10.1155/aess/9895980

Carvalho, J. P. S., Silva, T. S., & Costa, M. F. (2021). Distribution, characteristics and short-term variability of microplastics in beach sediment of Fernando de Noronha Archipelago, Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, *166*, 112212. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112212

Castañeta, G., Gutiérrez F., Nacaratte F., y Manzano, C. (2020). Microplásticos: zn contaminante que crece en todas las esferas ambientales, sus características y posibles riesgos para la salud pública por exposición. *Revista Boliviana de Química*, *37*(3), 160-175. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=426365043004

Ccallo, M., Sacaca, F., Callata, R., Vigo, J., y Calla, J. (2020). Biodegradación de polímeros de plástico por *Pseudomonas*. *Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo, 6*(2), 46-59. https://revistas.upeu.edu.pe/index.php/ri_ctd/article/view/1457/1834

Cruz Pérez, L. C. (2021). *Degradación de polietileno de baja densidad a partir de hongos de podredumbre blanca: revisión sistemática de la literatura* (Trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana). Repositorio Institucional Javeriano. http://hdl.handle.net/10554/57936

Chigwada, A., Oduor, H., y Tekere, M. (2023). Multivariate analysis of enriched landfill soil consortia provide insight on the community structural perturbation and functioning during low-density polyethylene degradation. *Microbiological Research*, *274*(2023), 127425. https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127425

Damian, V. S., & Paredes, L. A. (2026). Eficiencia de la degradación de polietileno de baja densidad por hongos filamentosos aislados de estiércol de vacuno [Tesis de postgrado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo].

Danso, D., Chow, J., y Streit, W. (2019). Plastics: Environmental and biotechnological perspectives on microbial degradation. *Applied and Environmental Microbiology*, *85*(19). https://doi.org/10.1128/AEM.01095-19

De la Torre, G. E., Dioses Salinas, D. C., Castro, J. M., Antay, R., Fernández, N. Y., Espinoza-Morriberón, D., & Saldaña-Serrano, M. (2020). Abundance and distribution of microplastics on sandy beaches of Lima, Peru. *Marine Pollution Bulletin*, *151*, 110877. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110877

Deghani, S., More, F., y Akhbarizadeh, R. (2017). Microplastic pollution in deposited urban dust, Tehran metropolis, Iran. *Environmental Science and Pollution Research, 24*, 20360–20371. https://doi.org/10.1007/s11356-017-9674-1

El-Sayed, M., Rabie, G., & Hamed, E. (2021). Biodegradation of low-density polyethylene (LDPE) using the mixed culture of *Aspergillus carbonarius* and *A. fumigatus*. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 14556-14584. doi.org/10.1007/s10668-021-01258-7

DSouza, G., Sheriff, R., Ullanat, V., Shrikrishna, A., Joshi, A., Hiremath, L., y Entoori, K. (2021). Fungal biodegradation of low-density polyethylene using consortium of Aspergillus species under controlled conditions. Heliyon, 7(e07008), 1-7. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07008

Febria, F. A., Syafrita, A., Putra, A., Hidayat, H., & Febrion, C. (2024). Degradation of low-density polyethylene by a novel strain of bacteria isolated from the plastisphere of marine ecosystems. Global Journal of Environmental Science and Management, 10(2), 805-820. https://doi.org/10.22035/gjesm.2024.02.24

Fuller, S., y Gautam, A. (2016). A procedure for measuring microplastics using pressurized fluid extraction. *Environmental Science & Technology, 50*(11), 5774–5780. https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00816

Gaytan, I., Sánchez, A., Burelo, M., Vargas, M., Liachko, I., Press, M., Sullivan, Cruz, M., y Loza, H. (2020). Degradation of recalcitrant polyurethane and xenobiotic additives by a selected landfill microbial community and its biodegradative potential revealed by proximity ligation-based metagenomic análisis. *Frontiers in Microbiology, 10*(2986). https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02986

Gobmann, I., Sübmuth, R., & Scholz-Böttcher, B. M. (2022). Plastic in the air?! - Spider webs as spatial and temporal mirror for microplastics including tire wear particles in urban air. *Science of the Total Environment*, 832. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155008

Gong, Z., Jin, L., Yu, X., Wang, B., Hu, S., Ruan, H., Sung, Y., Lee, H., y Jin, F. (2023). Biodegradation of low density polyethylene by the fungus *Cladosporium* sp. recovered from a landfill site. *Journal of Fungi*, *9*(605), 1-18. https://doi.org/10.3390/jof9060605

Gonzales Alcos, V. C. (2020). Capacidad biodegradativa de hongos filamentosos frente al polietileno. *Revista de Investigaciones*, 9(3), 205 - 217. https://doi.org/10.26788/riepg.v9i3.1625

Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación* (6ta ed.). Hill Interamericana Editores S.A. Hill. https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf

Ho, B. T., Roberts, T. K., & Lucas, S. (2018). An overview on biodegradation of polystyrene and modified polystyrene: The microbial approach. *Critical Reviews in Biotechnology*, 38(2), 308–320. https://doi.org/10.1080/07388551.2017.1355293

Idowu, K., Obasola, F., & Blessing, N. (2019). Biodegradation of low density polyethylene (LDPE) by certain indigenous bacteria and fungi*, International Journal of Environmental Studies*, 76(3), 428-440, https://doi.org/10.1080/00207233.2019.1579586

Iqbal, S., Xu, J., Allen, S. D., Khan, S., Nadir, S., Arif, M. S., & Yasmeen, T. (2020). Unraveling consequences of soil micro- and nano-plastic pollution on soil-plant system: Implications for nitrogen (N) cycling and soil microbial activity. *Chemosphere*, *260*, 127578. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127578

Jaiswal, S., Sharma, B., y Shukla, P. (2019). Integrated approaches in microbial degradation of plastics. *Environmental Technology & Innovation*, *17*, 100567. https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100567

Jones, J. S., Guézou, A., Medor, S., Nickson, C., Savage, G., Alarcón-Ruales, D., Galloway, T. S., Muñoz-Pérez, J. P., Nelms, S. E., Porter, A., Thiel, M., & Lewis, C. (2022). Microplastic distribution and composition on two Galápagos island beaches, Ecuador: Verifying the use of citizen science derived data in long-term monitoring. *Environmental Pollution*, *311*. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120011

Jordan, J., Casem, D., Bradley, J., Dwivedi, A., Brown, E., y Jordan, C. (2016). Mechanical properties of low density polyethylene. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, *2*(4), 411–420. https://doi.org/10.1007/s40870-016-0076-0

Kaur, P., Singh, K., y Singh, B. (2022). Microplastics in soil: Impacts and microbial diversity and degradation. *Pedosphere*, *32*(1), 49–60. https://doi.org/10.1016/s1002-0160(21)60060-7

Khandare, S. D., Agrawal, D., Mehru, N., & Chaudhary, D. R. (2022). Marine bacterial based enzymatic degradation of low-density polyethylene (LDPE) plastic. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *10*(3), 107437. https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107437

Khan, S., Ali, S. A., & Ali, A. S. (2022). Biodegradation of low-density polyethylene (LDPE) by mesophilic fungus '*Penicillium citrinum*' isolated from soils of plastic waste dump yard, Bhopal, India. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 1–15. https://doi.org/10.1080/09593330.2022.2027025

Krishnaswamy, V. G., Sridharan, R., Kumar, P. S., & Fathima, M. J. (2022). Cellulase enzyme catalyst producing bacterial strains from vermicompost and its application in low-density polyethylene degradation. *Chemosphere*, *288*(P2), 132552. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132552

Khruengsai, S., Sripahco, T., & Pripdeevech, P. (2021). Low-density polyethylene film biodegradation potential by fungal species from Thailand. *Journal of Fungi*, 7(594), 1-18. https://doi.org/10.3390/jof7080594

Kulié, D., Miloloza, M., Bulatovié, V., Ukie, S., Slouf, M., & Gajdosova, V. (2023). Screening the efficacy of a microbial consortium of bacteria and fingi isolated from different environmental samples for the degradation of LDPE/TPS films. *Separations*, 10(2). 79. doi.org/10.3390/separations10020079.

Kunlere, I. O., Fagade, O. E., & Nwadike, B. I. (2019). Biodegradation of low density polyethylene (LDPE) by certain indigenous bacteria and fungi. *International Journal of Environmental Studies*, *76*(3), 428–440. https://doi.org/10.1080/00207233.2019.1579586

Kutralam-Muniasamy, G., Pérez-Guevara, F., Elizalde-Martínez, I., & Shruti, V. C. (2020). Review of current trends, advances and analytical challenges for microplastics contamination in Latin America. Environmental Pollution, 267. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115463

Kuswytasari, N., Kurniawati, A., Aunurohim, A., Alami, N., Zulaika, E., Shovitri, M., Kumari, N., y Luqman, A. (2023). Plastic biodegradation potential of soil mangrove mold isolated from Wonorejo, Indonesia. Advancements in Life Sciences, 10(2), 228-238. https://www.submission.als-journal.com/index.php/ALS/article/view/1681

López, F., Pomaquero, J., y López, J. (2020). Análisis de la contaminación ambiental por plásticos en la ciudad de Riobamba. *Polo del Conocimiento*, *5*(12),725-742.

Mesquita, Y. W., Mengatto, M. F., & Nagai, R. H. (2022). Where and how? A systematic review of microplastic pollution on beaches in Latin America and the caribbean (LAC). *Environmental Pollution*, *314*, 120231. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120231

Ministerio del Ambiente, MINAM. (2016). Decreto legislativo Nº 1278 Ley de gestión integral de residuos sólidos. Ministerio del Ambiente. https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Decreto-Legislativo-N%C2%B0-1278.pdf

Miri, S., Saini, R., Davoodi, S. M., Pulicharla, R., Brar, S. K., & Magdouli, S. (2022). Biodegradation of microplastics: Better late than never. *Chemosphere*, *286*(P1), 131670. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131670

Mishra, S., Swain, S., Sahoo, M., Mishra, S., & Das, A. P. (2022). Microbial colonization and degradation of microplastics in aquatic ecosystem: A review. *Geomicrobiology Journal*, *39*(3–5), 259–269. https://doi.org/10.1080/01490451.2021.1983670

Mohy Eldin, A., Al-Sharnouby, S. F. S., ElGabry, K. I. M., & Ramadan, A. I. (2022). *Aspergillus terreus*, *Penicillium* sp. and *Bacillus* sp. isolated from mangrove soil having laccase and peroxidase role in depolymerization of polyethylene bags. *Process Biochemistry*, *118*, 215–226. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2022.04.030

Montazer, Z., Habibi Najafi, M., y Levin, D. (2019). Microbial degradation of low-density polyethylene and synthesis of polyhydroxyalkanoate polymers. *Canadian Journal of Microbiology*, *65*(3), 224–234. https://doi.org/10.1139/cjm-2018-0335

Mostajo, M., & Ambur, L. (2022). Efectividad de *Aspergillus* en la degradación de polietileno. *South Florida Journal of Environmental and Animal Science*, *2*(3), 234–253. https://doi.org/10.53499/sfjeasv2n3-002

Municipalidad Distrital De Reque (s.f.). Geografia. https://munireque.gob.pe/?p=65

Munir, E., Harefa, R. S. M., Priyani, N., & Suryanto, D. (2018). Plastic degrading fungi *Trichoderma viride* and *Aspergillus nomius* isolated from local landfill soil in Medan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *126*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/126/1/012145

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA). (2021). Inventario Nacional de Áreas Degradadas por Residuos Sólidos Municipales. Ministerio del Ambiente. https://www.gob.pe/institucion/oefa/informes-publicaciones/1908745-inventario-nacional-de-areas-degradadas-por-residuos-solidos-municipales

Ojha, N., Pradhan, N., Singh, S., Barla, A., Shrivastava, A., Khatua, P., Rai, V., & Bose, S. (2017). Evaluation of HDPE and LDPE degradation by fungus, implemented by statistical optimization. *Scientific Reports*, 7, Article 39515. https://doi.org/10.1038/srep39515

Ogu, C., Makut, M., Ekeleme, I., & Obiekezie, S. (2024). Cassava peels – A potencial co-subtrate for the biodegadation of low-density polyethlene (LDPE) using locally isolated bacteria and fungi. *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*, 9 (2), 26-34

Organización para el Desarrollo Sostenible AMBIDES. (2012). Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la Provincia de Chiclayo, Departamento de Lambayeque. Chiclayo: Municipalidad Provincial de Chiclayo. https://es.slideshare.net/teffycordova/pigars-provincia-chiclayo.

Perez-Venegas, D. J., Toro-Valdivieso, C., Ayala, F., Brito, B., Iturra, L., Arriagada, M., Seguel, M., Barrios, C., Sepúlveda, M., Oliva, D., Cárdenas-Alayza, S., Urbina, M. A., Jorquera,

A., Castro-Nallar, E., & Galbán-Malagón, C. (2020). Monitoring the occurrence of microplastic ingestion in Otariids along the Peruvian and Chilean coasts. *Marine Pollution Bulletin*, *153*, 110966. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110966

Pitt, J., & Hocking, A. (2009). Fungi and food spoilage. Third edition. Springer Nature (524 pages). https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-92207-2

Puliga, F., Zuffi, V., Baldo, D., Cavatorta, D., Zambonelli, A., Francioso, O., & Sanchez-Cortes, S. (2023). *Cladosporium cladosporioides* (strain Clc/1): a candidate for low-density polyethylene degradation. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, *10*(50), 1-11. https://doi.org/10.1186/s40538-023-00419-2

Qiu, X., Qi, Z., Ouyang, Z., Liu, P., & Guo, X. (2021). Interactions between microplastics and microorganisms in the environment: Modes of action and influencing factors. *Gondwana Research: International Geoscience Journal*, *108*, 102–119. https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.07.029

Raha, U. K., Kumar, B. R., & Sarkar, S. K. (2021). Policy Framework for Mitigating Land-based Marine Plastic Pollution in the Gangetic Delta Region of Bay of Bengal- A review. *Journal of Cleaner Production*, *278*, 123409. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123409

Rahman, A., Sarkar, A., Yadav, O. P., Achari, G., & Slobodnik, J. (2020). Potential human health risks due to environmental exposure to nano- and microplastics and knowledge gaps: A scoping review. *The Science of the Total Environment*, *757*(143872), 143872. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143872

Rani, R., Rathee, J., Kumari, P., Pal, N., y Rani, A. (2022). Biodegradation and detoxification of low-density polyethylene by an indigenous strain *Bacillus licheniformis* SARR1. *Journal of Applied Biology & Biotechnology, 10*(01), 9-21. https://doi.org/10.7324/jabb.2021.100102

Rodríguez, D., Silva, J., Rueda, J., y Guedes, E. (2020). A mini-review: current advances in polyethylene biodegradation. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, *36(2),* 32. https://doi.org/10.1007/s11274-020-2808-5

Roy, R., Mukherjee, G., Das Gupta, A., Tribedi, P., y Sil, A. (2021). Isolation of a soil bacterium for remediation of polyurethane and low-density polyethylene: a promising tool towards sustainable cleanup of the environment. *3 Biotech*, *11*(1), 29. https://doi.org/10.1007/s13205-020-02592-9

Rüthi, J., Rast, B. M., Qi, W., Perez-Mon, C., Pardi-Comensoli, L., Brunner, I., & Frey, B. (2023). The plastisphere microbiome in alpine soils alters the microbial genetic potential for plastic degradation and biogeochemical cycling. *Journal of Hazardous Materials*, *441*, 129941. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129941

Saira, Abdullah, Maroof, L., Iqbal, M., Farman, S., Lubna, & Faisal, S. (2022). Biodegradation of Low-Density Polyethylene (LDPE) Bags by fungi isolated from waste disposal soil. *Applied and Environmental Soil Science*, *2022*, 1–7. https://doi.org/10.1155/2022/8286344

Sánchez-Purihuamán, M., Barturén, A., Vásquez, S., Caro-Castro, J., Córdova-Rojas, L., Villanueva, C., Siche, R., y Carreño-Farfán, C. (2025). Polyethylene degradation under controlled conditions by *Aspergillus sp*. isolated from a landfill. *Journal of Human, Earth, and Future*, 6(3), 488–504. https://doi.org/10.28991/HEF-2025-06-03-01

Saxena, A., Jain, S., & Pareek, A. (2021). Estimation of possible biodegradation of polythene by fungal isolates growing on polythene debris. *Pollution*, *8*(2), 567–577. https://doi.org/10.22059/POLL.2021.331370.1195

Sathiyabama, M., Boomija, R., Sathiyamoorthy, T., Mathivanan, N., & Balaji, R. (2024). Mycodegradation of low- density polyethylene by *Cladosporium sphaerospermum*, isolated from platisphere. *Scientific Reports*, 14,8351. doi.org/10.1038/s41598-024-59032-4.

Sayed, M. S. (2025). Biodegradation of low-density polyethylene (LDPE) strips from waste plastic bags using marine-derived fungi. *Applied Biotecchonology Reports*. 12(1): 1586-1593. doi.org/10.30491/jabr.2024.455262.1727

Sheik, S., Chandrashekar, K. R., Swaroop, K., & Somashekarappa, H. M. (2015). Biodegradation of gamma irradiated low density polyethylene and polypropylene by endophytic fungi. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 105, 21–29. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.08.006

Schmaltz, E., Melvin, E. C., Diana, Z., Gunady, E. F., Rittschof, D., Somarelli, J. A., Virdin, J., & Dunphy-Daly, M. M. (2020). Plastic pollution solutions: emerging technologies to prevent and collect marine plastic pollution. *Environment International*, 144. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106067

Scheurer, M., y Bigalke, M. (2018). Microplastics in swiss floodplain soils. *Environmental Science & Technology, 52*(6), 3591–3598. https://doi.org/10.1021/acs.est.7b06003

Skariyyachan, S., Manjunatha, V., Sultana, S., Jois, C., Bai, V., y Vasist, K. (2016). Novel bacterial consortia isolated from plastic garbage processing areas demonstrated enhanced degradation for low density polyethylene. *Environmental Science and Pollution Research International*, *23*(18), 18307–18319. https://doi.org/10.1007/s11356-016-7000-y

Srikanth, M., Sandeep, T. S. R. S., Sucharitha, K., & Godi, S. (2022). Biodegradation of plastic polymers by fungi: a brief review. *Bioresources and Bioprocessing*, *9*(1). https://doi.org/10.1186/s40643-022-00532-4

Spina, F., Tummino, M. L., Poli, A., Prigione, V., Ilieva, V., Cocconcelli, P., Puglisi, E., Bracco, P., Zanetti, M., y Varese, G. C. (2021). Low density polyethylene degradation by

filamentous fungi. *Environmental Pollution*, 274(116548). https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116548

Sutkar, P., Hadkar, S., Kamble, S., y Dhulap, V. (2025). Biodegradation potential of low-density polyethylene (LDPE) using *Aspergillus niger* and *Phanerochaete chrysosporium*. *Discover Environment*, 3(7), 1-15. https://doi.org/10.1007/s44274-025-00188-9

Temporiti, M. E. E., Nicola, L., Nielsen, E., & Tosi, S. (2022). Fungal enzymes involved in plastics biodegradation. *Microorganisms*, *10*(6), 1–27. https://doi.org/10.3390/microorganisms10061180

Thushari, G. G. N., & Senevirathna, J. D. M. (2020). Plastic pollution in the marine environment. *Heliyon*, *6*(8), e04709. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04709

Tudor, D. T., & Williams, A. T. (2021). The effectiveness of legislative and voluntary strategies to prevent ocean plastic pollution: Lessons from the UK and South Pacific. *Marine Pollution Bulletin*, *172*(July), 112778. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112778

Vertus, D., Ruíz, M., Henriquéz, J., y Ortíz, V. (2017). Biodegradación bacteriana de polietileno y propuesta de aplicación en Cerro Patacón. *Revista de Iniciación Científica, 1*(1), 1-6. https://www.researchgate.net/publication/318315747_Biodegradacion_bacteriana_de_polietileno_y_propuesta_de_aplicacion_para_Cerro_Patacon

Williams, A. T., & Rangel-Buitrago, N. (2022). The past, present, and future of plastic pollution. *Marine Pollution Bulletin*, *176*, 113429. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113429

Yang, W., Gong, Z., Wang, B., Hu, S., Zhuo, Y., Jin, C., Jin, L., Lee, H., y Jin, F. (2024). Biodegradation of low-density polyethylene by mixed fungi composed of *Alternaria sp*. and Trametes sp. isolated from landfill sites. *BMC Microbiology*, 24(321), 1-12. https://doi.org/10.1186/s12866-024-03477-0

Yuan, Z., Nag, R., & Cummins, E. (2022). Human health concerns regarding microplastics in the aquatic environment - From marine to food systems. *Science of the Total Environment*, *823*, 153730. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153730

Yusuf, A., Sodiq, A., Giwa, A., Eke, J., Pikuda, O., Eniola, J. O., Ajiwokewu, B., Sambudi, N. S., & Bilad, M. R. (2022). Updated review on microplastics in water, their occurrence, detection, measurement, environmental pollution, and the need for regulatory standards. *Environmental Pollution*, *292*(PB), 118421. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118421

Xie, Y., Li, Y., Feng, Y., Cheng, W., & Wang, Y. (2022). Inhalable microplastics prevails in air: Exploring the size detection limit. *Environment International*, 162, 107151. https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107151

Zeenat, Bukhari, D., Shamim, S., y Rehman, A. (2021). Plastics degradation by microbes: A sustainable. *Science*, *33*(6), 101538. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101538

Zhang, Y., Pedersen, J., Eser, B., y Guo, Z. (2020). Biodegradation of polyethylene and polystyrene: From microbial deterioration to enzyme discovery. *Biotechnology Advances*, 60(107991), 107991. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2022.107991

ANEXOS

Anexo 1

Caldo mínimo sales minerales (en Liang et al., 2022)

Componentes	gL^{-1}
(K_2HPO_4) Fosfato dipotásico	1,0
(KH_2PO_4) Fosfato monopotásico	0,2
(NaCl) Cloruro de sodio	1,0
($CaCl_2 . 2H_2O$) Cloruro de calcio dihidratado	0,002
(H_3BO_3) Ácido bórico	0,005
($NH_4 . 2SO_4$) Sulfato de amonio	1,0
($MgSO_4 . 7H_2O$) Sulfato de magnesio heptahidratado	0,5
($CuSO_4.5H_2O$) Sulfato de cobre pentahidratado	0,001
($ZnSO_4.7H_2O$) Sulfato de zinc heptahidratado)	0,001
(MnSO4.7H2O) Sulfato den manganeso heptahidratado)	0,001
($FeSO_4.7H_2O$) (Sulfato ferroso heptahidratado)	0,01
Agua destilada	1000 mL

*pH 7,5

Agar mínimo sales minerales (en Liang et al., 2022)

Componentes	gL^{-1}
(K_2HPO_4) Fosfato dipotásico	1,0
(KH_2PO_4) Fosfato monopotásico	0,2
(NaCl) Cloruro de sodio	1,0
($CaCl_2 . 2H_2O$) Cloruro de calcio dihidratado	0,002
(H_3BO_3) Ácido bórico	0,005
($NH_4 . 2SO_4$) Sulfato de amonio	1,0
($MgSO_4 . 7H_2O$) Sulfato de magnesio heptahidratado	0,5
($CuSO_4.5H_2O$) Sulfato de cobre pentahidratado	0,001
($ZnSO_4.7H_2O$) Sulfato de zinc heptahidratado)	0,001
(MnSO4.7H2O) Sulfato den manganeso heptahidratado)	0,001
($FeSO_4.7H_2O$) (Sulfato ferroso heptahidratado)	0,01
Agar agar	15

*pH 7,5

Agar papa dextrosa (en Liang et al., 2022)

Componentes	gL^{-1}
Infusión de papa	200
Glucosa	0,5
Agar agar	15

*pH 7,5

Anexo 2

Biomasa formada por hongos filamentosos con glucosa y LDPE como fuentes de carbono

N°	Hongos filamentosos códigos	Biomasa formada (g)		Biomasa respecto al control %
		Glucosa	LDPE	
1	M6β	0,56	0,55	98,2
2	M06I	0,65	0,63	96,9
3	M26	0,60	0,58	96,7
4	M36	0,63	0,60	95,2
5	M17α	0,60	0,57	95
6	M3K	0,61	0,57	93,4
7	M15	0,58	0,54	93,1
8	M27	0,57	0,47	82,4
9	M12	0,41	0,20	48,7
10	M25	0,40	0,19	47,5
11	M11	0,41	0,19	46,3
12	M18	0,40	0,18	45
13	M35	0,41	0,18	43,9
14	M21	0,42	0,18	42,9
15	M39	0,40	0,17	42,5
16	M13	0,43	0,18	41,9
17	M20	0,41	0,17	41,6
18	M22	0,42	0,17	40
19	M8	0,43	0,17	39,53
20	M28	0,42	0,16	38,09
21	M29	0,43	0,16	37,02
22	M7	0,44	0,16	36,36
23	M34	0,45	0,16	35,55
24	M31	0,44	0,15	34,09
25	M41	0,45	0,15	33,33
26	M37	0,43	0,14	32,55
27	M19	0,45	0,14	31,11
28	M2	0,43	0,13	30,23

29	M23	0,44	0,13	29,54
30	M5	0,45	0,13	28,88
31	M7	0,43	0,12	27,90
32	M9	0,45	0,12	26,66
33	M24	0,47	0,12	25,53
34	M14	0,48	0,12	25
35	M13	0,49	0,12	24,48
36	M31	0,47	0,11	23,40
37	M35	0,48	0,11	22,91
38	M34	0,49	0,12	22,44
39	M40	0,50	0,11	22
40	M43	0,52	0,11	21,15
41	M42	0,50	0,10	20
42	M7β	0,51	0,10	19,23

Anexo 3

Variaciones del peso de microplásticos de LDPE degradados por hongos filamentosos durante 90 días

Tratamientos	Peso inicial				Peso final				Peso perdido			
	r1	r2	r3	x	r1	r2	r3	x	r1	r2	r3	x
T1 Hongo B1	0,0173	0,0173	0,0171	0,0172	0,0149	0,0150	0,0151	0,0150	13,87	13,29	11,70	12,95
T2 Hongo B2	0,0172	0,0174	0,0172	0,0173	0,0158	0,0159	0,0160	0,0159	8,14	8,62	6,98	7,91
T3 Hongo B3	0,0171	0,0170	0,0170	0,0170	0,0155	0,0153	0,0154	0,0154	9,36	10,00	9,41	9,59
T4 Consorcio 1 (B1+B2)	0,0175	0,0173	0,0176	0,0175	0,0149	0,0151	0,0152	0,0151	14,86	12,72	13,64	13,74
T5 Consorcio 2 (B2+B3)	0,0174	0,0177	0,0176	0,0176	0,0163	0,0161	0,0164	0,0163	6,32	9,04	6,82	7,39
T6 Consorcio 3 (B1+B3)	0,0171	0,0173	0,0173	0,0172	0,0140	0,0142	0,0143	0,0142	18,13	17,92	17,34	17,80
T7 Consorcio 4 (B1+B2+ B3)	0,0174	0,0172	0,0172	0,0173	0,0145	0,0148	0,0147	0,0147	16,67	13,95	14,53	15,05

Anexo 4

Cálculo del porcentaje de peso perdido:

$$\%\ Peso\ perdido = \frac{Peso\ inicial\ - Peso\ final}{Peso\ inicial} x\ 100$$

El peso perdido (%) se utilizó para calcular la tasa de reducción o remoción (k) que es una de las escalas para determinar la tasa de biodegradación por unidad de tiempo.

Cálculo de la tasa de reducción:

$$Tasa\ de\ reducción\ (K) = -\frac{1}{t}\left(In\frac{Peso\ final}{Peso\ inicial}\right)$$

Donde: K es la tasa de ingestión del polímero por día, t es el tiempo en días, peso final e inicial en (g).

Cálculo de la vida residual:

$$t\,{}^{1}\!/_{2} = \frac{0{,}6931}{K}$$

Con base a la tasa de reducción del polímero se calculó la vida media del LDPE residual (t1/2) en días o tiempo requerido para reducir el peso del polímero a la mitad. (Sathiyabama et al., 2024).

Consorcio 1
Peso inicial= 0, 0172
Peso final= 0, 0150

$$\%\ Peso\ perdido = \frac{Peso\ inicial\ - Peso\ final}{Peso\ inicial} x\ 100$$

$$\%\ Peso\ perdido = \frac{0{,}0172\ - 0{,}0150}{0{,}0172} x\ 100$$

$$\%\ Peso\ perdido = 12{,}8$$

$$Tasa\ de\ reducción\ (K) = -\frac{1}{90}\left(In\frac{0,0150}{0{,}0172}\right)$$

$$K = 1{,}521\ mg\ día^{-1}$$

$$t\,{}^{1}\!/_{2} = \frac{0{,}6931}{K} = \frac{0{,}6931}{0{,}0151} = 455{,}68 \text{ días}$$

Anexo 5

Diseño estadístico Diseño completamente al azar (DCA), ANOVA de una vía Supuestos

Normalidad: Los valores p value > 0.05, se cumple el supuesto de normalidad, se realizó mediante el test de Shapiro-Wilk, los datos tienen una distribución normal.

	N	W	p
Peso Final	21	0.972356	0.784465

	Tests of Normality (Spreadsheet7)		
Variable	N	W	p
Tratamiento	21	0.926058	0.114744
Peso final	21	0.972356	0.784465

Homogeneidad de varianzas (Homocedasticidad): Según el test de Levene, los valores p>0.05,, se cumple el supuesto.

	F	p
Peso Final	0.405063	0.863566

	Levene's Test for Homogeneity of Variances (Spreadsheet7) Effect: "Tratamiento" Degrees of freedom for all F's: 6, 14			
	MS Effect	MS Error	F	p
Peso final	0.000000	0.000000	0.405063	0.863566

ANOVA paramétrico

Como se cumplen los supuestos, se realiza el análisis del ANOVA paramétrico de una vía

Univariate Tests of Significance for Peso final (Spreadsheet7)
Over-parameterized model
Type III decomposition

Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	0.004858	1	0.004858	275719.9	0.000000
Tratamiento	0.000009	6	0.000002	87.3	0.000000
Error	0.000000	14	0.000000		

Según este análisis, el valor de p<0.05, por lo tanto los tratamientos son significativos.

Análisis post-hoc: Tukey

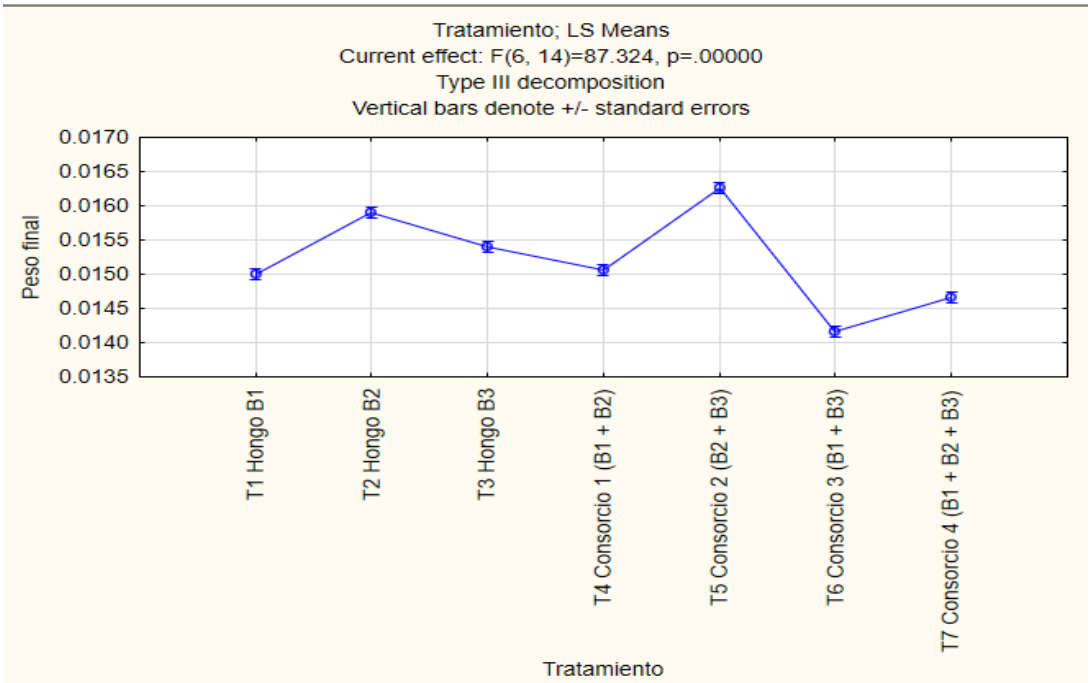
Tukey HSD test; variable Peso final (Spreadsheet7)
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests
Error: Between MS = .00000, df = 14.000

Cell No.	Tratamiento	{1} .01500	{2} .01590	{3} .01540	{4} .01507	{5} .01627	{6} .01417	{7} .01467
1	T1 Hongo B1		0.000180	0.030524	0.995171	0.000174	0.000194	0.090609
2	T2 Hongo B2	0.000180		0.005789	0.000194	0.052953	0.000174	0.000174
3	T3 Hongo B3	0.030524	0.005789		0.090609	0.000185	0.000174	0.000291
4	T4 Consorcio 1 (B1 + B2)	0.995171	0.000194	0.090609		0.000174	0.000180	0.030524
5	T5 Consorcio 2 (B2 + B3)	0.000174	0.052953	0.000185	0.000174		0.000174	0.000174
6	T6 Consorcio 3 (B1 + B3)	0.000194	0.000174	0.000174	0.000180	0.000174		0.005789
7	T7 Consorcio 4 (B1 + B2 + B3)	0.090609	0.000174	0.000291	0.030524	0.000174	0.005789	

Grupos homogéneos

Tukey HSD test; variable Peso final (Spreadsheet7)
Homogenous Groups, alpha = .05000
Error: Between MS = .00000, df = 14.000

Cell No.	Tratamiento	Peso final Mean	1	2	3	4	5
6	T6 Consorcio 3 (B1 + B3)	0.014167					****
7	T7 Consorcio 4 (B1 + B2 + B3)	0.014667	****				
1	T1 Hongo B1	0.015000	****	****			
4	T4 Consorcio 1 (B1 + B2)	0.015067		****	****		
3	T3 Hongo B3	0.015400			****		
2	T2 Hongo B2	0.015900				****	
5	T5 Consorcio 2 (B2 + B3)	0.016267				****	



Todos los tratamientos son beneficiosos; sin embargo, se observa cuando en los consorcios de tratamientos se incluye B1, reduce la degradación de LDPE. El tratamiento 5 presenta la mayor degradación de LDPE