

Biotecnología microbiana y enzimática para la degradación de plásticos

Microbial and enzymatic biotechnology for plastic degradation

Leticia Casas Godoy^{1*}, Jesús Alberto Urbar Ulloa², Sandra Lizbeth Ramírez Pérez², Juan Raúl Chavira Ontiveros², Adriana Belén Castillejos Pérez², Samadhi Nibbana Rodríguez Zavala³, María Camila Sinisterra Sierra², Andrés Méndez Zamora², Amador Roberto Campos Valdez²

¹ SECIHTI-Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Camino Arenero 1227, El Bajío, 45019 Zapopan, Jalisco, México.

² Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Camino Arenero 1227, El Bajío, 45019 Zapopan, Jalisco, México.

³ Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara, Blvd. Marcelino García Barragán 1421, Colonia Olímpica, C.P. 44430, Guadalajara, Jalisco, México.

* Autor de correspondencia: lcasas@ciatej.mx

Palabras clave:

residuos plásticos, hidrolasas, oxidoreductasas, transformación, PET, LDPE

Keywords:

plastic residues, hydrolases, oxidoreductases, transformation, PET, LDPE

Resumen

Los plásticos son materiales ampliamente utilizados por su resistencia, bajo costo y versatilidad, pero estas propiedades favorecen su persistencia ambiental. Este artículo revisa, desde un enfoque de divulgación científica, cómo la biotecnología microbiana y enzimática puede contribuir al estudio de su transformación. Se abordan las etapas de la biodegradación de plásticos, la búsqueda de microorganismos en ambientes contaminados, el papel de enzimas hidrolíticas y oxidativas y el uso de herramientas bioinformáticas para descubrir nuevas enzimas candidatas. Además, se integran trabajos desarrollados por el grupo en sitios contaminados con residuos plásticos en México y en la bioprospección computacional de enzimas con actividad potencial sobre el tereftalato de polietileno. Se muestra que la modificación biológica de plásticos es un proceso gradual y dependiente del material. Por lo tanto, estas aproximaciones deben entenderse como parte de estrategias complementarias de reducción, manejo, reciclaje y valorización sustentable de residuos en distintos contextos ambientales e industriales.

Abstract

Plastics are widely used materials because of their resistance, low cost, and versatility. However, these same properties favor their environmental persistence. This article reviews how microbial and enzymatic biotechnology can contribute to the study of plastic transformation. It addresses the stages involved in plastic biodegradation, the search for microorganisms in contaminated environments, the role of hydrolytic and oxidative enzymes, and the use of bioinformatic tools to discover new enzyme candidates. In addition, it integrates work developed by the group in sites contaminated with plastic waste in Mexico and in the computational bioprospection of enzymes with potential activity on polyethylene terephthalate. The article shows that biological modification of plastics is a gradual process that depends on the material. Therefore, these approaches should be understood as part of complementary strategies for the reduction, management, recycling, and sustainable valorization of plastic waste in environmental and industrial contexts.

Recibido: 18 de mayo 2026
Revisado: 10 de junio 2026
Aceptado: 03 de julio 2026
Publicado: 01 de agosto 2026



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Introducción

Los plásticos son parte de nuestra vida diaria. Sus aplicaciones incluyen empaques, textiles, dispositivos médicos y electrónicos, así como materiales de construcción, por mencionar algunos. Sus propiedades, como ligereza, versatilidad, resistencia y bajo costo, han logrado que sean utilizados en todos los sectores. Sin embargo, estas mismas características los han convertido en uno de los principales problemas ambientales de la actualidad, debido a su acumulación en distintos ecosistemas. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) reportó que aproximadamente 353 millones de toneladas de residuos plásticos fueron generadas en 2019, de las cuales solo 32 millones fueron recolectadas para reciclaje, mientras que 174 millones se enviaron a rellenos sanitarios, 67 millones se incineraron y una fracción importante fue mal gestionada o liberada al ambiente (OECD, 2022). En México se ha observado un comportamiento similar, donde el consumo de plásticos y la generación per cápita de residuos plásticos se estiman en 66 kg/año y 59 kg/año, respectivamente (GIZ, 2023).

El impacto ambiental de los plásticos no se limita a su acumulación. Bajo condiciones ambientales, los plásticos pueden fragmentarse por factores abióticos como la radiación solar, la acción mecánica, los cambios de temperatura y procesos oxidativos. Esta fragmentación genera partículas más pequeñas que llegan a convertirse en micro y nanoplasticos y a dispersarse en suelos, ríos, lagos y océanos. Además, estas partículas pueden incorporarse en la cadena alimenticia y llegar al cuerpo humano por el consumo de alimentos y agua contaminados, así como por inhalación de partículas presentes en el aire. Actualmente, se han detectado microplásticos en muestras humanas como heces, sangre, placenta, leche materna y tejido pulmonar, aunque sus efectos a largo plazo todavía están siendo estudiados (Nouri et al., 2025).

Uno de los principales retos para enfrentar este problema es que no todos los plásticos tienen la misma estructura química ni el mismo comportamiento en el ambiente. Algunos, como el tereftalato de polietileno, conocido como PET, contienen enlaces químicos que pueden ser atacados por ciertas enzimas (Yoshida et al., 2016). Otros, como el polietileno de baja densidad, o LDPE, presentan cadenas de carbono más resistentes y carecen de enlaces fácilmente hidrolizables (Ghatge et al., 2020). Por esta razón, estudiar la transformación biológica de plásticos requiere considerar la naturaleza química de cada polímero y los mecanismos que podrían participar en su modificación.

La biotecnología puede ofrecer nuevas formas de transformar residuos plásticos; sin embargo, no es una solución única ni inmediata. El manejo de estos residuos requiere estrategias complementarias que incluyan políticas públicas para limitar el

uso de plásticos innecesarios, cambios en los patrones de consumo, mejoras en los sistemas de recolección, separación y reciclaje, rediseño de materiales y desarrollo de tecnologías biológicas. Organismos internacionales como la OCDE y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente han señalado que la contaminación por plásticos debe abordarse desde todo el ciclo de vida del material, no solo a partir de su disposición final (OECD, 2022; UNEP, 2023)@.

El estudio de la biodegradación de plásticos es un área compleja, en la que deben considerarse la estructura del polímero, las condiciones ambientales, los microorganismos presentes y las enzimas que producen. No se trata solo de buscar microorganismos capaces de “desaparecer” los plásticos, sino de comprender los procesos involucrados en su transformación, los cambios físicos y químicos que se generan, y las herramientas que permiten evaluarlos. El grupo de trabajo inició esta línea de investigación en el año 2020, con el desarrollo de proyectos orientados a identificar, entender y modificar enzimas microbianas relacionadas con la biodegradación de plásticos. Esta línea aprovecha la experiencia acumulada del CIATEJ en microbiología, enzimología, bioprocesos y biocatálisis para generar conocimiento de frontera y explorar alternativas biotecnológicas frente a un problema ambiental actual. En el marco del 50 aniversario del CIATEJ, este artículo presenta cómo esta línea se ha incorporado en el área de la Biotecnología Industrial mediante la búsqueda y evaluación de microorganismos nativos, el estudio de enzimas y el uso de herramientas bioinformáticas. Se busca mostrar cómo un enfoque biotecnológico puede contribuir al conocimiento necesario para el manejo, reciclaje y valorización de residuos plásticos.

Biodegradación de plásticos

La biodegradación de plásticos es un proceso gradual en el que participan factores físicos, químicos y biológicos. Para que los microorganismos interactúen con estos materiales, la superficie del polímero suele requerir modificaciones previas que faciliten su colonización o transformación. Este proceso se ha descrito en cuatro etapas: biodeterioro, biofragmentación, asimilación y, en algunos casos, mineralización (Figura 1) (Sheth et al., 2019).

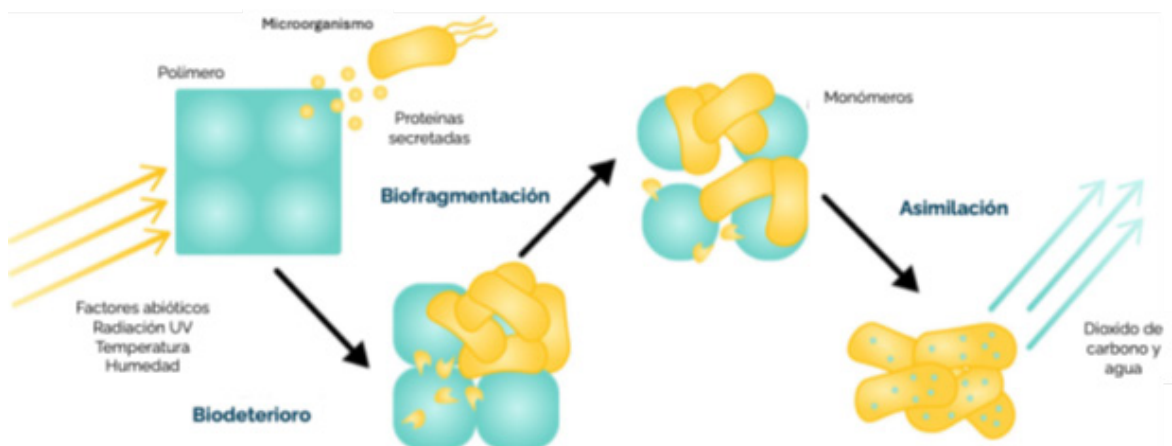


Figura 1. Etapas involucradas en la degradación de plásticos

Fuente: Adaptado de Sheth et al., 2019

El biodeterioro es la etapa en la que ocurren cambios iniciales en la superficie del plástico. Factores ambientales como la radiación UV, la temperatura, la fotooxidación y la abrasión generan variaciones en la rugosidad, hidrofobicidad o composición química del polímero. Estos cambios facilitan que los microorganismos se adhieran al material, formen biopelículas y produzcan enzimas capaces de modificarlo (Mohan et al., 2020; Sheth et al., 2019). Durante la biofragmentación, el polímero se rompe parcialmente o totalmente en fragmentos de menor tamaño, como oligómeros, monómeros u otros compuestos derivados. Enzimas como PETasas, cutinasas, esterasas y lipasas actúan sobre los enlaces éster de plásticos como el PET y liberan productos más pequeños que podrían ser transformados por los microorganismos (Danson et al., 2019). En cambio, en polímeros como el polietileno, la biofragmentación es más limitada y suele requerir procesos oxidativos previos o simultáneos (Ghatge et al., 2020).

La siguiente etapa es la asimilación, la cual ocurre cuando los productos generados durante la fragmentación son lo suficientemente pequeños para ingresar a las células microbianas y ser utilizados como fuente de carbono o energía. Finalmente, la mineralización ocurre cuando los compuestos derivados del plástico son transformados en productos simples, como dióxido de carbono, agua y metano en condiciones anaerobias y con biomasa microbiana. Esta etapa permite distinguir entre una transformación parcial del material y una biodegradación más completa. No obstante, demostrar mineralización es experimentalmente complejo, en especial para polímeros recalcitrantes como el polietileno (Sheth et al., 2019).

Microorganismos como punto de partida

Microorganismos capaces de participar en la transformación de plásticos pueden encontrarse en tiraderos, rellenos sanitarios, suelos contaminados, sedimentos, plantas

de reciclaje y residuos plásticos expuestos al ambiente. No todos los organismos presentes en estos sitios serán capaces de degradar plásticos, pero se favorece la presencia de comunidades microbianas adaptadas a colonizar estos materiales o a producir enzimas relacionadas con su modificación (Gambarini et al., 2021; Sheth et al., 2019). Un concepto que ha surgido para entender esta interacción es el de *plastisfera*, que se refiere a las comunidades microbianas que se forman sobre los residuos plásticos. En estas superficies pueden crecer bacterias, hongos, microalgas y otros microorganismos formando biopelículas y participando en etapas tempranas de la transformación del material (Amaral-Zettler et al., 2020).

Bajo este enfoque, el grupo de trabajo ha explorado sitios contaminados con residuos plásticos en México como fuente de microorganismos nativos. En un estudio realizado en un tiradero de plásticos en Tepic, Nayarit, se aislaron bacterias con actividades enzimáticas extracelulares de interés, incluyendo esterasas, lipasas, cutinasas y lacasas. Dentro de las cepas aisladas y evaluadas, el 27.9% presentó actividad esterasa/lipasa y el 19.8% tuvo capacidad para hidrolizar el aceite mineral. Las cepas que mostraron actividades más altas correspondieron a los géneros *Bacillus* y *Pseudomonas* (Casas-Godoy et al., 2025). De manera complementaria, en tiraderos contaminados con plásticos en Mazamitla, Jalisco, se combinó el análisis de diversidad microbiana con el aislamiento de microorganismos cultivables y la evaluación de actividades enzimáticas asociadas con la transformación de plásticos (Sinisterra-Sierra et al., 2025). A partir del análisis de muestra de suelo, en este sitio se identificaron 49 filos y 946 géneros, dentro de los cuales *Pseudomonas*, *Bacillus* y *Streptomyces* fueron los más representativos. En cuanto a las cepas cultivables, los géneros *Pseudomonas* y *Bacillus* fueron los más abundantes. El cribado de actividades enzimáticas mostró que el 60% de las cepas tuvo por lo menos una actividad enzimática, siendo la actividad carboxilesterasa la más común, encontrando que el 44% fue capaz de degradar la tributirina, un 22% el aceite mineral y un 22% el aceite de linaza. Estos trabajos muestran que los ambientes contaminados pueden ser puntos de interés para identificar microorganismos y enzimas con potencial biotecnológico (Casas-Godoy et al., 2025; Sinisterra-Sierra et al., 2025).

Enzimas en la transformación de plásticos

A partir del estudio de los microorganismos asociados con residuos plásticos, surgen otras preguntas: ¿qué enzimas producen? ¿Cómo podrían participar en la transformación del material? Las enzimas son proteínas capaces de acelerar reacciones químicas específicas. En el caso de los plásticos, su papel depende de la estructura del polímero, por lo que no existe una sola enzima capaz de actuar sobre todos los tipos de plástico.

En los poliésteres, como el PET, las enzimas hidrolíticas pueden romper enlaces éster. Durante la hidrólisis de PET, las enzimas rompen los enlaces éster del polímero y generan oligómeros o monómeros, los cuales se siguen rompiendo en compuestos más solubles como bis(2-hidroxietil) tereftalato (BHET) y mono(2-hidroxietil) tereftalato (MHET). Estos productos pueden continuar hidrolizándose hasta ácido tereftálico (TPA) y etilenglicol (Figura 2). Entre las enzimas capaces de participar en estos procesos se encuentran las esterasas, lipasas, cutinasas y PETasas, las cuales pueden liberar fragmentos más pequeños que después podrían ser utilizados por algunos microorganismos (Figura 3) (Danso et al., 2019; Tournier et al., 2023).

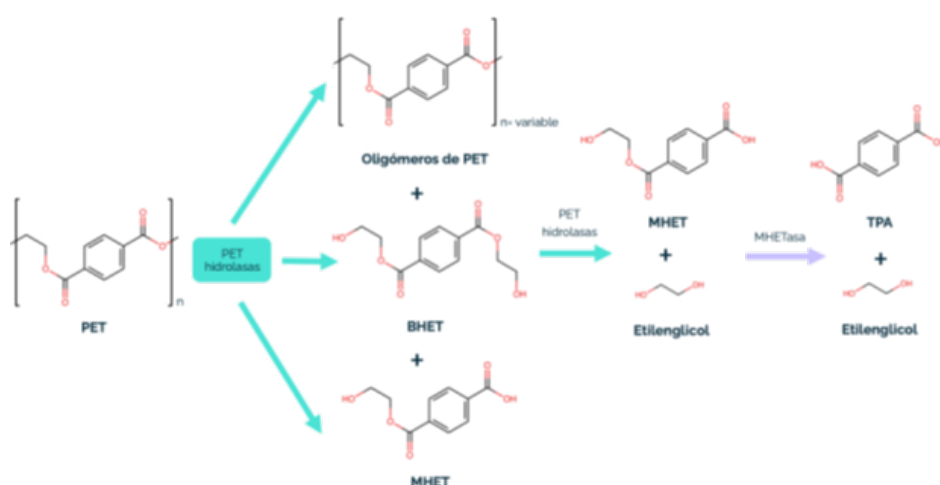


Figura 2. Ruta simplificada de la degradación enzimática de PET. Las PET hidrolasas rompen el polímero y generan oligómeros, BHET y MHET. El BHET puede hidrolizarse en MHET, que puede ser transformado por MHETasas en TPA y etilenglicol

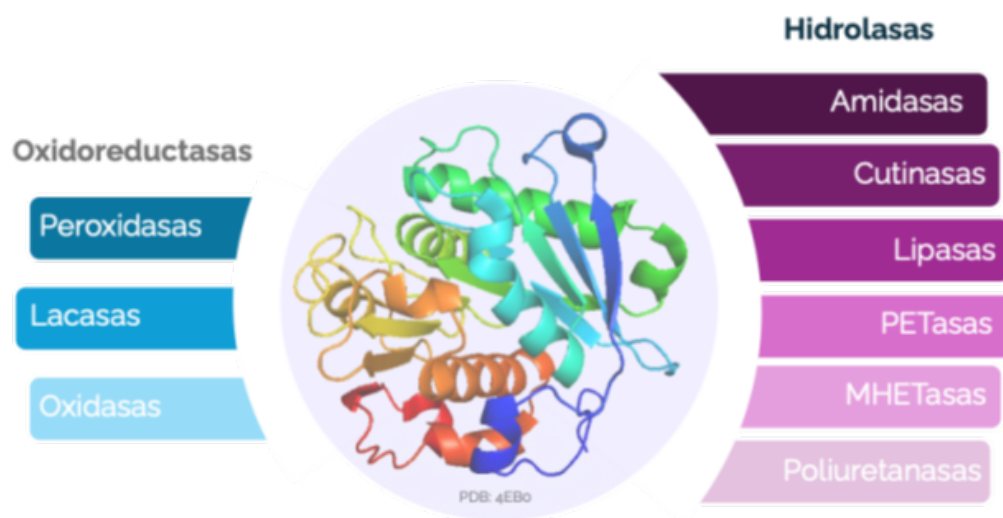


Figura 3. Enzimas involucradas en la degradación de plásticos
Fuente: Elaboración propia, cutinasa de metagenoma de hoja LCC (PDB 4EB0)

En polímeros más recalcitrantes, como el polietileno, la transformación biológica representa un reto mayor. Su cadena principal está formada por enlaces carbono-carbono, por lo que no puede ser hidrolizada de la misma manera que el PET. En estos casos, se propone la participación de enzimas oxidativas, como lacasas, peroxidasas u oxigenasas, que son capaces de introducir grupos funcionales o modificar la superficie del material, facilitando etapas posteriores de transformación (Figura 3) (Ghatge et al., 2020; Srikanth et al., 2022).

En el grupo de trabajo, la evaluación de actividades enzimáticas ha sido una estrategia para seleccionar microorganismos de interés. Las actividades esterasa, lipasa, cutinasa y lacasa se han utilizado como indicadores iniciales del potencial de bacterias y hongos para participar en la modificación de plásticos. Estos ensayos no demuestran por sí solos una biodegradación completa, pero permiten identificar candidatos que pueden estudiarse con mayor detalle en etapas posteriores.

Bioinformática en el descubrimiento de nuevas enzimas

La búsqueda de enzimas capaces de transformar plásticos también se puede realizar utilizando estrategias bioinformáticas que permiten explorar millones de secuencias disponibles en bases de datos y seleccionar aquellas que podrían tener características similares a enzimas ya conocidas. Esta estrategia reduce el número de candidatos que deben evaluarse experimentalmente y permite dirigir la búsqueda hacia enzimas con mayor probabilidad de participar en la transformación de polímeros.

En el caso del PET, esta estrategia ha sido muy eficiente, ya que enzimas conocidas, como PETasas, cutinasas, esterasas y lipasas, comparten características estructurales y funcionales. Esta información ha permitido construir modelos de búsqueda, comparar secuencias, analizar regiones conservadas y predecir estructuras tridimensionales. También es posible evaluar si una enzima candidata podría interactuar con el polímero o fragmentos del mismo. Estas herramientas no sustituyen al trabajo experimental, pero permiten priorizar candidatos antes de pasar al laboratorio (Tournier et al., 2023; Wu et al., 2023).

En el grupo de trabajo se aplicaron herramientas de bioprospección *in silico* para buscar enzimas eucarióticas con potencial actividad sobre PET (Méndez-Zamora et al., 2024). La estrategia integró modelos ocultos de Markov, análisis de secuencias, modelado estructural, acoplamiento molecular y dinámica molecular. Se lograron identificar 31 secuencias con potencial actividad PETasa en organismos de los géneros *Akanthomyces*, *Aspergillus*, *Botrytis*, *Elsinoe*, *Fusarium*, *Microthyrium*, *Penicillium*, *Pestalotiopsis*, *Talaromyces*, *Thermothielavioides*, *Trichoderma* y *Venturia*. Los análisis de acoplamiento molecular con monómeros de PET, seguidos de un análisis de con-

trol de procesos, permitieron seleccionar tres hongos del género *Aspergillus* como candidatos que fueron evaluados experimentalmente usando compuestos modelo y PET posconsumo. En las pruebas, los tres hongos, *Aspergillus oryzae*, *Aspergillus awamori* y *Aspergillus luchuensis*, lograron degradar PET posconsumo y liberar sus productos de hidrólisis, con *A. luchuensis* como la cepa más eficiente.

La bioinformática funciona como una etapa de exploración y selección que permite acelerar el descubrimiento de enzimas y ampliar la búsqueda hacia organismos poco estudiados. En la transformación biotecnológica de plásticos, las herramientas computacionales son un puente entre la información disponible y la evaluación experimental de nuevas enzimas.

Del candidato al laboratorio

Después de identificar microorganismos o enzimas candidatas, su capacidad para degradar plásticos debe ser evaluada en el laboratorio. Esto se puede confirmar mediante modificaciones del polímero, la liberación de monómeros o productos derivados o cambios medibles en el material. Una primera aproximación es el uso de compuestos modelo, como BHET en el caso del PET, que permiten observar si una enzima o microorganismo tiene actividad sobre enlaces similares a los del polímero. Posteriormente, pueden utilizarse muestras de plástico reales, como PET posconsumo o películas de LDPE, para evaluar cambios más cercanos a las condiciones del material que se encuentra presente en el ambiente.

En el trabajo del grupo, esta transición del candidato al laboratorio ha sido clave. Por ejemplo, enzimas identificadas mediante bioprospección *in silico* fueron evaluadas experimentalmente mediante ensayos con BHET y PET. Esta combinación permitió pasar de una predicción computacional a una evaluación funcional de la actividad sobre materiales relacionados con PET (Mendez-Zamora et al., 2024). En los estudios con microorganismos aislados de sitios contaminados, la evaluación enzimática ha permitido seleccionar bacterias y hongos con actividades como esterasas, lipasas, cutinasas y lacasas. Destacan cepas de *Serratia marcescens* (240.3 ± 11.0 U/L), *Comamonas testosteroni* (193.9 ± 2.5 U/L), *Pseudomonas koreensis* (180.4 ± 8.0 U/L), capaces de producir enzimas extracelulares al utilizar aceite mineral como inductor. Además, *C. testosteroni* (125.6 ± 15.5 U/L), *Chryseobacterium joostei* (125.1 ± 14.2 U/L) y *Bacillus mycoides* (120.6 ± 9.9 U/L) mostraron actividad cutinasa. Además, cepas de *Lelliottia amnigena*, *S. marcescens*, *Pseudomonas chlororaphis* y *Pseudomonas kilonensis* fueron capaces de crecer en medios donde los plásticos fueron la única fuente de carbono (Sinisterra-Sierra et al., 2025). Estas actividades y capacidad para crecer en plásticos ayudan a identificar candidatos que pueden evaluarse mediante análisis de productos

de reacción, pérdida de peso, cambios químicos en la superficie o modificación de la estructura del material (Casas-Godoy et al., 2025; Sinisterra-Sierra et al., 2025).

Así, el paso del candidato al laboratorio permite distinguir entre potencial biológico y evidencia experimental, ayudando a seleccionar los microorganismos o enzimas más prometedores, reconociendo las limitaciones de cada sistema.

La degradación no es desaparición inmediata

Uno de los retos al comunicar la biodegradación de plásticos es evitar la idea de que un microorganismo o una enzima hace que el material desaparezca rápidamente. La transformación de un plástico inicia con cambios pequeños, como modificación de la superficie, formación de grietas, aumento de rugosidad, aparición de nuevos grupos químicos o liberación de fragmentos de menor tamaño. Estos cambios indican que el material está siendo afectado, pero no necesariamente una biodegradación completa. Estas modificaciones pueden observarse mediante microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés). En películas de LDPE expuestas a un cultivo bacteriano se observan biomasa adherida después del tratamiento y alteraciones en la superficie después de retirar la biomasa en comparación con la película control (Figura 4).

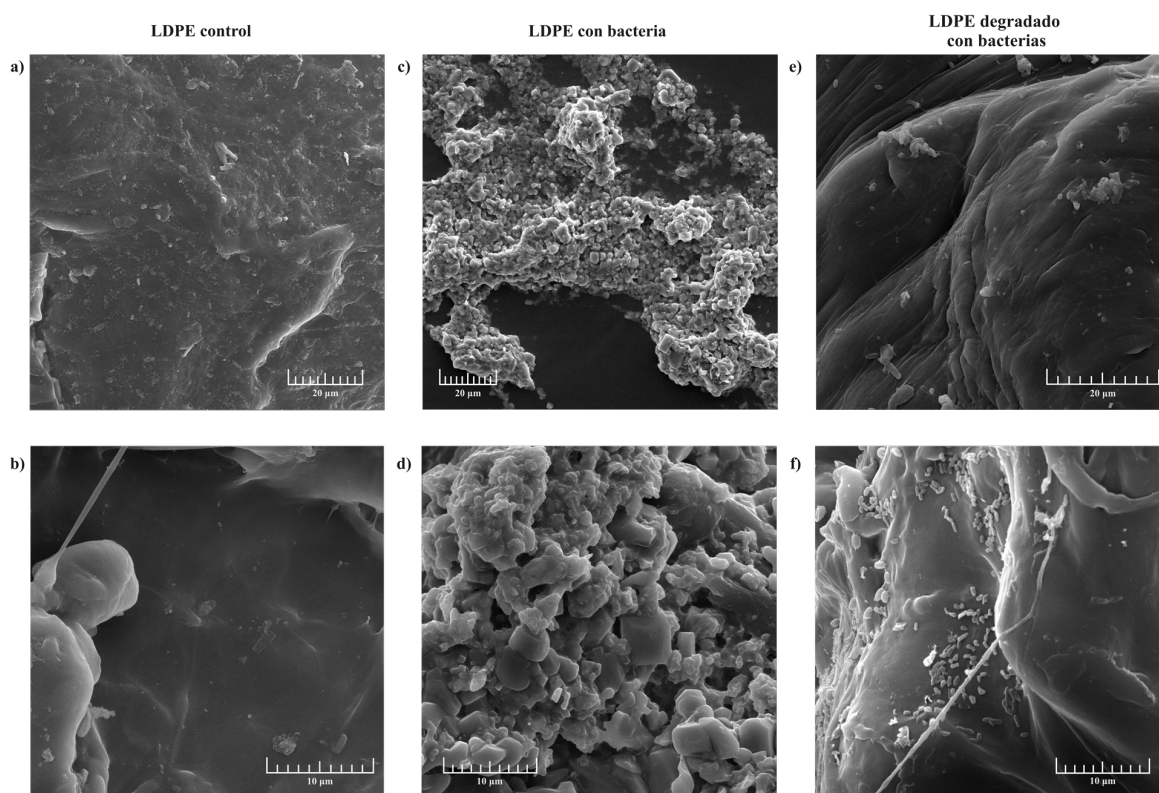


Figura 4. Micrografías electrónicas de barrido de películas de LDPE: (a, b) control sin tratamiento biológico; (c, d) película tratada con una bacteria y sin lavar; (e, f) película tratada y lavada para retirar la biomasa

Evidencias como pérdida de peso, formación de halos, cambios por espectroscopía o crecimiento microbiano en presencia del polímero son útiles como señales iniciales, pero requieren complementarse con otros análisis (Sinisterra-Sierra et al., 2025). Para demostrar una transformación más avanzada, es necesario identificar productos derivados del polímero, evaluar si estos pueden ser asimilados por los microorganismos y, en el mejor de los casos, comprobar su mineralización a productos simples como dióxido de carbono, agua o biomasa microbiana (Chow et al., 2023; Ghatge et al., 2020; Sheth et al., 2019).

Esta distinción permite valorar mejor el papel de la biotecnología. El objetivo no es prometer que los microorganismos resolverán solos la contaminación por plásticos, sino entender qué procesos biológicos pueden contribuir a su modificación y bajo qué condiciones.

Una línea emergente en Biotecnología Industrial

Desde esta perspectiva, el trabajo desarrollado por el grupo ha buscado integrar distintas herramientas para estudiar la transformación biológica de plásticos. La línea parte de la prospección de microorganismos nativos de sitios contaminados, continúa con la evaluación de actividades enzimáticas extracelulares y se complementa con estrategias bioinformáticas para identificar nuevas enzimas candidatas. Esta integración permite abordar el problema desde diferentes escalas: el ambiente, los microorganismos, las enzimas y el material.

Estos trabajos muestran que la transformación de plásticos puede estudiarse desde un enfoque biotecnológico integral, sin perder de vista sus limitaciones. La investigación en esta área contribuye a generar conocimiento sobre los mecanismos que participan en la modificación de polímeros como PET y LDPE, y puede apoyar en el futuro el desarrollo de estrategias complementarias para el manejo, reciclaje y valorización de residuos plásticos. En este sentido, la línea representa un campo emergente dentro de la Biotecnología Industrial, con potencial para formar recursos humanos, fortalecer colaboraciones y aportar soluciones basadas en evidencia científica.

Conclusiones

La biodegradación de plásticos es un proceso progresivo y dependiente del tipo de polímero, de las condiciones ambientales y de los microorganismos o enzimas involucrados. En algunos casos, como el PET, existen enzimas capaces de iniciar su hidrólisis bajo condiciones específicas. En otros, como el LDPE, la transformación biológica representa un reto mayor debido a la estabilidad de su estructura química. Por ello, el estudio de microorganismos, enzimas y herramientas bioinformáticas permite comprender mejor

las etapas iniciales de transformación. Desde esta perspectiva, la línea desarrollada por el grupo aporta conocimiento útil para explorar el papel de la biotecnología industrial en el manejo, reciclaje y valorización de residuos plásticos, como parte de estrategias más amplias y complementarias frente a la contaminación plástica.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un potencial conflicto de interés.

Financiamiento

Este proyecto fue financiado por el proyecto FORDECYT-PRONACES/1727997/2020.

Referencias

- Amaral-Zettler, L. A., Zettler, E. R., & Mincer, T. J. (2020). Ecology of the plastisphere. *Nature Review Microbiology*, 18(3), 139-151. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0308-0>
- Casas-Godoy, L., Ávila López, Y. C., Saldierna Gómez, A. A., Sumaya Martínez, M. T., Kirchmayr, M. R., Campos Valdéz, A. R., & Robles Machuca, M. (2025). Prospección de enzimas microbianas para la biodegradación de plásticos a partir de un sitio con altos residuos plásticos sólidos en Tepic, Nayarit, México. *Revista Bio Ciencias*, 12, e1913. <https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1913>
- Chow, J., Perez-Garcia, P., Dierkes, R., & Streit, W. R. (2023). Microbial enzymes will offer limited solutions to the global plastic pollution crisis. *Microbial Biotechnology*, 16(2), 195-217. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14135>
- Danso, D., Chow, J., Streit Wolfgang, R., & Drake Harold, L. (2019). Plastics: Environmental and Biotechnological Perspectives on Microbial Degradation. *Applied and Environmental Microbiology*, 85(19), e01095-01019. <https://doi.org/10.1128/AEM.01095-19>
- Gambarini, V., Pantos, O., Kingsbury, J. M., Weaver, L., Handley, K. M., & Lear, G. (2021). Phylogenetic Distribution of Plastic-Degrading Microorganisms. *mSystems*, 6(1). <https://doi.org/10.1128/mSystems.01112-20>
- Ghatge, S., Yang, Y., Ahn, J.-H., & Hur, H.-G. (2020). Biodegradation of polyethylene: a brief review. *Applied Biological Chemistry*, 63(1). <https://doi.org/10.1186/s13765-020-00511-3>
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. (2023). *Protección de las regiones costeras mexicanas y sus ecosistemas mediante la reducción de residuos plásticos (PROCEP)*. <https://www.giz.de/en/downloads/giz2023-es-facsheet-PROCEP.pdf>

- Mendez-Zamora, A., Diaz-Vidal, T., Robles-Machuca, M., Pereira-Santana, A., & Casas-Godoy, L. (2024). Unveiling potential PET degrading eukaryotes through *in silico* bioprospecting of PETases. *Science of the Total Environment*, 948, 174978. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174978>
- Mohanan, N., Montazer, Z., Sharma, P. K., & Levin, D. B. (2020). Microbial and Enzymatic Degradation of Synthetic Plastics. *Frontiers in Microbiology*, 11, 580709. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.580709>
- Nouri, M., Massahi, T., & Hossini, H. (2025). Microplastics in human body: a narrative on routes of exposure to contamination and potential health effects. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 37(1), 2538535. <https://doi.org/10.1080/26395940.2025.2538535>
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2022). *Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/de747aef-en>
- Sheth, M. U., Kwartler, S. K., Schmaltz, E. R., Hoskinson, S. M., Martz, E. J., Dunphy-Daly, M. M., Schultz, T. F., Read, A. J., Eward, W. C., & Somarelli, J. A. (2019). Bioengineering a Future Free of Marine Plastic Waste. *Frontiers in Marine Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00624>
- Sinisterra-Sierra, M. C., Campos-Valdez, A., Pereira-Santana, A., Zamora-Briseno, J. A., Ramirez-Perez, S. L., Gonzalez-Escobar, J. L., Kirchmayr, M. R., Barreira-Martinez, I., Robles-Machuca, M., & Casas-Godoy, L. (2025). Microbial diversity and enzymatic potential for plastic degradation in contaminated dumpsites in Mazamitla, Jalisco. *Environmental Research*, 283, 122170. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.122170>
- Srikanth, M., Sandeep, T., Sucharitha, K., & Godi, S. (2022). Biodegradation of plastic polymers by fungi: a brief review. *Bioresources and Bioprocessing*, 9(1), 42. <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00532-4>
- Tournier, V., Duquesne, S., Guillaumot, F., Cramail, H., Taton, D., Marty, A., & Andre, I. (2023). Enzymes' Power for Plastics Degradation. *Chemical Reviews*, 123(9), 5612-5701. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00644>
- United Nations Environment Programme. (2023). *Turning off the tap: How the world can end plastic pollution and create a circular economy*. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/42277>
- Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y., Toyohara, K., Miyamoto, K., Kimura, Y., & Oda, K. (2016). A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science*, 351(6278), 1196-1199. <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>