

NORMATIVAS EN RELACIÓN A RESIDUOS PLÁSTICOS EN MÉXICO; LA BIOTECNOLOGÍA COMO ALIADA EN BIORREMEDIACIÓN

Leticia Narciso-Ortiz¹, Carolina Peña-Montes¹ and Manuel A. Lizardi-Jiménez^{2*}

¹Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Veracruz. Unidad de Investigación y Desarrollo en Alimentos. Veracruz, México. C.P. 91897

²SECIHTI-Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México. C.P. 78210

*Responsable de publicación: Manuel A. Lizardi-Jiménez, manuel.lizardi@uaslp.mx

Resumen

La producción mundial de plásticos está en aumento año con año; los plásticos son parte de la vida diaria, percibir la vida sin los plásticos es prácticamente imposible. Aunque los impactos negativos de los plásticos en la salud humana no se conocen a detalle, las primeras evidencias científicas deben servir como base para que exista una regulación estricta, sobre todo lo referente al uso y desecho de plásticos. También se deben buscar alternativas de biorremediación de contaminación plástica amigables con el medio ambiente. El objetivo de este trabajo fue realizar una revisión sobre las regulaciones en México respecto a la contaminación plástica y evidenciar las alternativas biotecnológicas para la remediación de contaminantes plásticos. Actualmente, no existe una Ley Federal ni General que regule el manejo de los residuos plásticos. Las leyes actuales de México regulan el desecho solo de grandes generadores de plásticos, pero es necesario que se regule la fabricación, uso y destino final de microplásticos. Por otro lado, la biotecnología nos otorga un sinnúmero de herramientas para poder contrarrestar la contaminación plástica, como el uso de microorganismos o enzimas. Es necesario invertir en investigación y tecnología para escalar estos procesos y poder disminuir la contaminación que ya aqueja al planeta.

Palabras Claves: contaminación, polímeros, regulaciones, microorganismos

Abstract

World plastic production is increasing year after year; plastics are part of daily life; perceiving life without plastics is practically impossible. Although the negative impacts of plastics on human health are not known in detail, the first scientific evidence should serve as a basis for strict regulation, especially regarding the use and disposal of plastics. Environmentally friendly plastic pollution bioremediation alternatives should also be sought. The aim of this work was to carry out a review of the regulations in Mexico regarding plastic pollution and to demonstrate biotechnological alternatives for the remediation of plastic contaminants. Currently, there is no Federal or General Law that regulates the management of plastic waste. Current Mexican laws regulate the disposal of only large plastic generators, but it is necessary to regulate the manufacture, use, and final destination of microplastics. On the other hand, biotechnology gives a lot of tools to minimize plastic pollution, such as the use of microorganisms or enzymes. It is necessary to invest in research and technology to scale these processes and reduce the pollution that affects the planet.

Key Words: pollution, polymers, regulations, microorganisms

Introducción

La producción mundial de plásticos está en aumento año con año, a pesar de que entre el año 2019-2020 un pequeño estancamiento se observó debido a la pandemia Covid-19, la producción para el año 2023 aumentó a 413.8 millones de toneladas, de las cuales más del 90 % son plásticos de origen fósil. Los principales tipos de plásticos producidos son: polipropileno (PP) (19 %), polietileno de baja densidad (PELD) (14 %), cloruro de polivinilo (PVC) (12.8 %), polietileno de alta densidad (PEHD) (12.2 %), tereftalato de polietileno (PET) (6.2 %), poliuretano (PUR) (5.3 %) y poliestireno (PS) (5.2 %). Los usos de estos plásticos son embalaje en primer lugar (44 %), seguido de la industria de construcción (18 %) y en el tercer puesto la industria automotriz (8 %), siendo China es el país con mayor producción de plásticos, con el 32 % de la producción mundial, seguido de Europa (27 %) y en tercer lugar Norte América con 18% de la producción mundial (Plastic Europe 2024).

Como puede verse a nuestro alrededor, los plásticos son parte de la vida diaria; percibir la vida sin los plásticos es prácticamente imposible. El verdadero problema se presenta cuando la vida útil de los artículos plásticos termina y es necesario proporcionarles un destino final, ya que la mayoría de los residuos terminan en los ecosistemas, principalmente ecosistemas acuáticos. Los plásticos vertidos en ecosistemas acuáticos eventualmente se fragmentarán, produciendo plásticos de menor tamaño (< 5 mm), llamados microplásticos, que, al ser consumidos por la fauna, podrían ser introducidos a la cadena alimentaria y llegar al ser humano.

Los impactos negativos de los plásticos en la salud humana no se conocen a detalle, pero recientes descubrimientos como la primera evidencia de microplásticos en placenta (Ragusa *et al.*, 2021), sangre (Leslie *et al.*, 2022) y tejido pulmonar (Amato-Lourenço *et al.*, 2021) humanos, deberían ser alertas rojas para poner manos a la obra y atacar este tipo de contaminación.

En primer lugar, debe existir una regulación estricta sobre todo lo referente al uso y desecho de plásticos, ya que México es el

quinto país con mayor producción de desechos plásticos mal gestionados, por debajo solo de India, China, Brasil e Indonesia (Osuna-Laveaga *et al.*, 2023). Aunado a esto, deben buscar alternativas de biorremediación de contaminación plástica amigables con el medio ambiente. Para ello, la biotecnología puede ofrecer interesantes alternativas. La biotecnología es la integración de las ciencias naturales y la ingeniería con el objetivo de lograr la aplicación de organismos, células o moléculas provenientes de ellos, en productos o servicios; la biotecnología utiliza estos bioprocesos como mecanismos operativos, y el desarrollo y mejoramiento de estos procesos proporcionan alternativas tecnológicas para resolver innumerables problemas en salud, alimentos, energía, y ambiente. La biotecnología ambiental abarca el desarrollo de bioprocesos para el diagnóstico de contaminación, productos para prevenir contaminación y biorremediación (Gavrilescu 2010; Barragán-Ocaña *et al.*, 2020;). La biorremediación es una técnica para remover, minimizar o neutralizar contaminantes del ambiente utilizando las rutas metabólicas de organismos como hongos o bacterias (Sharma 2020).

El objetivo de este trabajo fue realizar una revisión sobre las regulaciones en México respecto a la contaminación plástica y evidenciar las alternativas biotecnológicas para la remediación de contaminantes plásticos. Se revisaron las leyes, normas y reglamentos de México publicados hasta el momento, donde se hace mención de regulación de plásticos y microplásticos. También se buscaron publicaciones científicas sobre biorremediación de contaminación plástica.

Regulación de residuos plásticos y microplásticos en México

Actualmente, algunas leyes y normas tienen inmersas pequeñas menciones respecto a los plásticos.

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (DOF 08-05-2023) hace mención en el Artículo 7 punto VI:

“Son facultades de la Federación: Expedir las normas oficiales mexicanas que

establezcan, entre otros, los criterios de eficiencia ambiental y tecnológica que deben cumplir los materiales con los que se elaborarán productos, envases, empaques y embalajes de plásticos y poliestireno expandido que al desecharse se convierten en residuos. Dichas normas deberán considerar los principios de reducción, reciclaje y reutilización en el manejo de los mismos”

Y en el Artículo 28 punto III:

“Estarán obligados a la formulación y ejecución de los planes de manejo, según corresponda: Los grandes generadores y los productores, importadores, exportadores y distribuidores de los productos que al desecharse se convierten en residuos sólidos urbanos o de manejo especial que se incluyan en los listados de residuos sujetos a planes de manejo de conformidad con las normas oficiales mexicanas correspondientes; los residuos de envases plásticos, incluyendo los de poliestireno expandido; así como los importadores y distribuidores de neumáticos usados, bajo los principios de valorización y responsabilidad compartida,”

El artículo 28 solo obliga a formular y ejecutar los planes de manejo a los grandes generadores de residuos plásticos, es decir a los que generan cantidades mayores a 10 t anuales, de acuerdo a la NOM-161-SEMARNAT-2011 (DOF 01-02-2013).

Referente a esta Ley, se han decretado algunas propuestas de adición o reforma respecto a fomentar la educación sobre el impacto ambiental producido por plásticos, fomentar la utilización de materiales biodegradables, implementar un Programa de Sustitución de Plástico Biodegradable (Gaceta del Senado 2017, Sistema de Información Legislativa 2013) y reservar los envases, empaque y embalajes plásticos de un solo uso a productos médicos o de ayuda humanitaria (H. Congreso del Estado de Oaxaca 2023), ninguna de ellas autorizada hasta el momento.

La atribución a la Federación de expedir normas en cuestión de contaminación plástica, en general es lo óptimo, veremos que normas han sido sesgadas en este sentido.

La NOM-161-SEMARNAT-2011 (DOF 01-02-2013) *Que establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo*, considera en su listado, los residuos plásticos originados por grandes generadores (> 10 t anuales), es específico los resultantes de centros médico-asistenciales, agroplásticos generados por las actividades agrícolas, silvícolas y forestales y los residuos de PET, PS, PE, PEAD, PEBD, PVC, PP y Policarbonato (PC), de actividades que generen más de 10 t al año. Es decir, solo las entidades generadoras de este tipo de plásticos y en cantidades grandes, son los que están sujetos a presentar planes de manejo especial para sus residuos.

Si bien, un gran adelanto se ha perpetrado, dado que prácticamente todos los estados del país han prohibido la comercialización, distribución y entrega al consumidor de bolsas de plástico (PE), popotes de PP y charolas para transportar alimentos (PS, unicel), fabricados total o parcialmente de plástico, diseñados para su desecho después de un solo uso excepto los que sean compostables. Esta prohibición tiene su base en la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal (Gaceta Oficial de la CDMX 2023) que entró en vigor en diciembre 2020 para las bolsas plásticas y en enero 2021 para los demás productos en CDMX. Aunque no exista una Ley Federal ni General, en el orden estatal la mayoría de las entidades ya han legislado en la materia, ya sea reformando sus leyes locales o reglamentos municipales.

La Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal, en su última versión publicada en abril del 2023 (Gaceta Oficial de la CDMX 2023) se incluye la definición de *“Microplásticos: Fragmentos de plástico de tamaño inferior a 5 milímetros”*; en enero del 2021 ya se había incluido la prohibición de comercializar, distribuir y entregar productos que contengan microplásticos añadidos intencionalmente, pero con esta nueva adición de la definición, sin duda se

trata de los microplásticos que las investigaciones científicas han reportado.

Al igual que con los plásticos, para los microplásticos tampoco existe una Ley Federal ni General que los regule. Diputadas y diputados en 2019 (Sistema de Información Legislativa 2019) y 2020 (Sistema de Información Legislativa 2020) presentaron la iniciativa de adicionar al artículo 269 de la Ley General de Salud el párrafo “*Queda prohibida la elaboración, importación y comercialización de productos cosméticos que contengan microplásticos. Se considerará microplástico a las partículas de plástico de hasta 5 milímetros de diámetro*”, la cual no ha sido aprobada. Dicha iniciativa tiene como base legislaciones de otros países, como Canadá, Estados Unidos y China que desde 2018, 2019 y 2020 respectivamente, prohibieron la fabricación, envasado y distribución de cosméticos y artículos de tocador que contengan partículas plásticas menores o iguales a 5 mm, incluso en los dos primeros países mencionados también se prohibió el uso de microplásticos en medicamentos de venta libre (Osuna-Laveaga *et al.*, 2023).

Pasando a otras legislaciones en las que no se mencionan directamente los plásticos o microplásticos pero que se podría hacer uso de ellas para proteger a la sociedad y al medio ambiente, esto con base en los antecedentes de estos residuos como importantes contaminantes ambientales y posibles factores de riesgo de salud humana, se encuentra en primer lugar, la Ley Suprema del sistema jurídico mexicano, La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (DOF 15-04-2025) en el Artículo 4 menciona que “*Toda Persona tiene derecho a la protección de la salud...*” y “*Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar...*”; es decir, ya sea por salud o medio ambiente sano, la sociedad mexicana tiene derecho a una regulación estricta de residuos plásticos. Esto también porque es un Derecho Humano Universal, reconocido por la Asamblea General de la Organización de las Naciones Unidas

(ONU) en julio de 2022 “*El derecho humano a un medio ambiente limpio, saludable y sostenible*” (A/76/462/Add.2, 2021).

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (DOF 08-05-2023) también hace referencia a este derecho en el Artículo 1 “*...tienen por objeto garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente sano y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, valorización y gestión integral de los residuos peligrosos, mineros y metalúrgicos, sólidos urbanos, de manejo especial; prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación...*”.

En cuanto a leyes, podemos mencionar la Ley Federal de Responsabilidad Ambiental (DOF 20-05-2021), que en el Artículo 10 menciona que “*Toda persona física o moral que con su acción u omisión ocasione directa o indirectamente un daño al ambiente, será responsable y estará obligada a la reparación de los daños, o bien, cuando la reparación no sea posible a la compensación ambiental que proceda, en los términos de la presente Ley. De la misma forma estará obligada a realizar las acciones necesarias para evitar que se incremente el daño ocasionado al ambiente*” como parte del Capítulo Segundo llamado *Obligaciones derivadas de los daños ocasionados al ambiente*, ya que la contaminación plástica es inminente, cualquier persona física o moral que contamine o pueda estar contaminando con residuos plásticos, debería reparar los daños y/o realizar acciones para incrementar el daño ambiental.

Ahora, si algún argumento pudiera debatir el hecho de que los estudios en temas referentes a daños a la salud humana por plásticos o microplásticos están en su etapa temprana, se puede recurrir al Principio de Precaución, mencionado en el punto III, del Artículo 26 de la Ley General de Cambio Climático (DOF 01-04-2024) “*Artículo 26. En la formulación de la política nacional de cambio climático se observarán los principios de:...III.*

Precaución, cuando haya amenaza de daño grave o irreversible, la falta de total certidumbre científica no deberá utilizarse como razón para posponer las medidas de mitigación y adaptación para hacer frente a los efectos adversos del cambio climático.”. Donde se establece que la ejecución de actividades para la mitigación de contaminación ambiental se debe realizar incluso si la evidencia científica no es total referente a los impactos ambientales negativos.

Referente a actividad internacionales en materia de gestión de residuos plásticos, en marzo de 2022, la ONU adopta una resolución histórica para desarrollar al 2024 un instrumento jurídico internacional para combatir la contaminación plástica: *“Fin de la contaminación por plásticos: hacia un instrumento internacional jurídicamente vinculante”* donde participaron representantes de 175 países (UNEP/EA.5/Res.14, 2022).

Otro aspecto muy importante cuando se busca lograr un cambio es el Movimiento Social, el cual ya se ha hecho presente para exigir al Gobierno Mexicano regulaciones relativas a residuos y producción de plásticos por medio de la Declaratorio Xitla (2022). La Declaratoria tiene diez exigencias, de las que mencionaremos 3:

- “5. Se elabore una Ley General de Economía Circular que no sea solo una legislación para empaques y embalajes que incluya todos los sectores industriales no solo a la industria del plástico; y se establezcan líneas base como el principio de precaución, políticas claras de Responsabilidad Extendida del Productor;*
- 6. Se transparente el listado de aditivos en los plásticos y haya claridad en el etiquetado de los productos que omiten mencionar el tipo real de plástico.*
- 7. Se reconozca que ninguna planta de agua residual filtra microplásticos, lo que sigue siendo un problema que termina afectando la salud marina y humana.”*

Se resalta la exigencia de una Ley General de Economía Circular para todos los sectores industriales, aunque valdría la pena considerar también la Economía Verde, que es aquella que además de

mejorar la economía y la sociedad, también reduce los riesgos ambientales (Domínguez *et al.*, 2020). Otro aspecto importante son los aditivos que contienen los productos elaborados con plástico, por ejemplo, el bisfenol A y los ftalatos que son disruptores endocrinos, sustancias que pueden alterar el sistema hormonal humano causando enfermedades reproductivas, trastornos metabólicos, enfermedades neurológicas y hasta varios tipos de cáncer si se ingieren o inhalan. Además, los residuos plásticos pueden acarrear estos compuestos tóxicos a los ecosistemas dañando la flora y fauna (Campanale *et al.*, 2020). Otro estudio ha revelado también que la exposición a bisfenol A y ftalatos por medio de biberones en periodo gestacional y de lactancia aumenta el riesgo de desarrollar ansiedad, depresión, trastorno del espectro autista y trastorno de déficit de atención e hiperactividad (Solleiro-Villavicencio *et al.*, 2020).

Y en cuanto a las plantas de tratamiento de aguas residuales en nuestro país, no son aptas para detener los microplásticos, pudiendo llegar al ser humano a través del efluente de agua, incluso el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA 2019) detectó presencia de microplásticos en las plantas de tratamiento Los Berros y Miravalle, así como en sus fuentes de abastecimiento la presa Valle de Bravo y el Lago de Chapala, tanto en agua como en sedimentos.

Si bien es cierto, una buena noticia de los trabajos del Gobierno se dio a conocer el pasado julio (2023) donde la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) con el apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) trabajan en la elaboración del Plan Nacional de Acción para Residuos Marinos y Contaminación Plástica (Plan REMAR), cuyo objetivo es identificar acciones e indicadores que permitan implementar una política pública sobre Residuos Marinos y Contaminación Plástica, y que integre los principales resultados del Inventario Nacional de Fuentes de Contaminación Plástica (INFCP) (SEMARNAT 2023a). El INFCP tiene como objetivo conjuntar, analizar e

interpretar la información existente sobre la contaminación por plásticos en México, de la fuente al mar, para servir como base en el desarrollo del Plan REMAR. El Inventario está conformado por cuatro componentes: Identificación de puntos críticos de contaminación plástica, análisis de las características de la gestión de residuos, evaluación de la presencia en ambientes acuáticos, terrestres y producto de consumo y evaluación de contaminación marina por plásticos y microplásticos. En el INFCP se reportó la identificación de dos regiones críticas asociadas a los ríos Suchiate, Colorado y Tijuana, basadas en el potencial de los ríos para llevar contaminación plástica al océano; las regiones críticas identificadas en las costas fueron Nayarit, Oaxaca y el límite estatal Veracruz-Tamaulipas. El 80% de la contaminación plástica marina se detectó que proviene de fuentes ferretes: descargas de aguas residuales domésticas, turismo, pesca, acuicultura, embarcaciones e industrias que general pellets y microplásticos (SEMARNAT 2023b).

La biotecnología como aliada en la biorremediación de contaminación plástica

La biotecnología es una ciencia que integra las ciencias naturales y la ingeniería con la finalidad de utilizar organismos, células o moléculas derivados de estos, en bienes o servicios. La biotecnología ambiental incluye a los procesos de biorremediación. La biorremediación es un método para eliminar, reducir o equilibrar contaminantes ambientales mediante el uso de organismos o enzimas. Estos organismos absorben los contaminantes y producen otras moléculas más sencillas que no se consideran contaminantes. Se han reportado diferentes organismos como degradadores de diversos plásticos, se incluyen organismos superiores como los gusanos, y principalmente microorganismos como los hongos y bacterias. A continuación se mencionan algunos de ellos.

Polipropileno (PP)

El polipropileno es utilizado en empaques, productos desechables y prácticamente en todas las industrias, ya que su estructura

es muy estable, razón por la cual su biodegradación en el ambiente es muy lenta. Los procesos aplicados para biodegradar PP suelen necesitar tratamientos previos como altas temperaturas o irradiación UV.

Un importante estudio sobre degradación de PP es el publicado por Yang *et al.* en el año 2020, donde los gusanos amarillos de la harina (*Tenebrio molitor*) y los supergusanos (*Zophobas atratus*) fueron utilizados para degradar PP en forma de espuma. Después de 35 días, el consumo de PP fue de 68.11 % y 39.70 % respectivamente para cada organismo. La capacidad de estos gusanos para consumir el PP se atribuye a su microbioma intestinal, ya que *Citrobacter* sp. y *Enterobacter* sp., fueron asociados al microbioma de *Z. atratus* y *Kluyvera* a *T. molitor*. En un estudio más reciente, Jeon *et al.* (2021) aislaron la bacteria *Lysinibacillus* sp JJY0216, la cual logró degradar 4% de PP después de 26 días sin un pretratamiento, un adelanto importante en la degradación de este plástico.

Por otro lado, los microplásticos de PP son también un serio problema ambiental, debido a que afectan ecosistemas marinos y terrestres, el estudio de su biodegradación es tema crucial. Habib *et al.* en 2020 evaluaron la degradación de microplásticos de PP por medio de las bacterias *Pseudomonas* sp. ADL15 y *Rhodococcus* sp. ADL36 aisladas de suelo Antártico durante 40 días, obteniendo un porcentaje de degradación de 17.3% y 7.3% por cada bacteria.

Polietileno (PE)

Un gusano también ha sido reportado en la degradación de PE. El gusano de la polilla de la cera (*Galleria mellonella*), tiene la capacidad de degradar 1.95 g de películas de PELD por larva después de 21 días. El microbioma del gusano revela cambios significativos en la bacteria *Serratia* cuando es alimentada con este plástico (Lou *et al.*, 2020). *Aspergillus flavus* PEDX3 fue aislado del intestino de este gusano (*Galleria mellonella*), siendo el hongo capaz de degradar microplásticos de PE de baja y alta densidad después de 28 días, dos enzimas que podrían estar involucradas en el proceso fueron

identificadas como oxidasas multicobre similares a lacasas (Zhang *et al.*, 2019).

En cuanto a bacterias, dos *Pseudomonas* (*P. knackmussii* N1-2 y *P. aeruginosa* RD1-3) aisladas de una planta de tratamiento de aguas residuales, fueron reportadas como capaces de degradar películas de PE utilizadas en agricultura en un porcentaje de 5.95 ± 0.03 % y 3.62 ± 0.32 % respectivamente. Las enzimas identificadas secretadas en el proceso fueron monooxigenasas, dioxigenasas e hidrolasas (Hou *et al.*, 2022).

Por su parte, respecto a la bacteria marina *Microbulbifer hydrolyticus* IRE-31 aislada de residuos industriales marinos ricos en lignina, se ha reportado que después de 30 días de cultivo con PELD, este presentó cambios visibles en su superficie y cambios en sus grupos funcionales, que sugieren la oxidación del plástico (Li *et al.*, 2020).

El PEHD es un poco más difícil de degradar, pocos estudios se han especializado en degradar este tipo de plástico con hongos, entre ellos se encuentra la investigación de Kang *et al.* que en 2019 reportaron que el hongo *Bjerkandera adusta* TBB-03 puede degradar PEHD en presencia de un sustrato de lignocelulosa (astillas de madera de freno), obteniendo cambios químicos, estructurales y morfológicos en la superficie del plástico.

De esta revisión, se puede observar que la atención se encuentra en microorganismos que degradan naturalmente algún biopolímero, para investigar si las enzimas que producen, son aptas para degradar polímeros sintéticos, como lo son los plásticos.

Cloruro de polivinilo (PVC)

La larva *Tenebrio molitor* también ha sido reportada en el tratamiento de microplásticos de PVC, Peng *et al.* en 2020 reportaron una ingesta de 36.62 ± 6.79 mg de PVC por cada 100 larvas por día, durante 16 días y la presencia de residuos de PVC y carbonos clorados en el excremento de las larvas.

Los microorganismos tienen un gran potencial en biodegradación, y algo a lo que se le ha apostado, es al aislamiento de microorganismos de ambientes contaminados, por ejemplo, el trabajo de Saeed *et al.* (2022). Ellos aislaron dos

hongos, *Aspergillus niger* y *Aspergillus glaucus* y dos bacterias, *Bacillus licheniformis* y *Achromobacter xylosoxidans* de suelo contaminado con residuos plásticos. Los hongos demostraron degradación de PVC de 10 y 32 % respectivamente y las bacterias de 15 y 17 % respectivamente, después de 4 semanas.

En 2020, Giacomucci *et al.* reportaron por primera vez la biodegradación de películas de PVC por consorcios marinos en condiciones anaerobias. Después de 7 meses, la pérdida de peso del plástico máxima encontrada fue de 11.7 ± 0.6 %, e incluso aparentemente actuando contra los aditivos y la cadena del polímero.

Ya que se han aislado hongos y bacterias de ambientes contaminados, es probable que el uso de consorcios microbianos sea un camino prometedor en la biodegradación de plásticos.

Tereftalato de polietileno (PET)

La bacteria más conocida en cuanto a degradación de PET es la famosa *Idemonella sakaiensis* 201-F6, aislada de un ambiente donde estaba expuesta al PET. Esta bacteria es capaz de utilizar el plástico como su única fuente de carbono y energía, produciendo dos enzimas especializadas en la despolimerización de PET, denominadas PETasa y MHETasa cuyos sustratos son PET y el intermediario mono(2-hidroxietil) tereftalato (MHET) (Yoshida *et al.*, 2016). A partir de este descubrimiento se ha trabajado con el aislamiento, expresión, caracterización y mejoramiento de estas enzimas tan importantes.

Por otro lado, las cutinasas tanto de hongos como de bacterias, son enzimas que han sido ampliamente estudiadas para la degradación de PET (Sui *et al.*, 2023). Incluso cutinasas de hongos han sido expresadas en bacterias para mejorar su actividad catalítica. Por ejemplo, el trabajo de Vázquez-Alcántara *et al.* (2021), que expresaron una cutinasa del hongo *Moniliophthora roreri* en *Escherichia coli*, obteniendo un porcentaje de degradación del 31 % de PET con la enzima recombinante después de 21 días.

En nuestro grupo de trabajo, se han probado bacterias para la degradación de PET, en la que los mejores resultados se

observaron fue utilizando *Bacillus muralis*, aislada de suelo de bosque (Narciso-Ortiz *et al.*, 2020). Recientemente, también se publicaron resultados de microorganismos aislados de residuos plásticos encontrados en el Sistema Arrecifal Veracruzano, donde se aislaron bacterias y hongos con actividad enzimática del tipo hidrolasas de ácidos de ésteres carboxílicos y porcentajes de degradación de hasta 10 % para la bacteria *Aneurinibacillus migulanus* y 17 % para el hongo *Aspergillus flavus* (Narciso-Ortiz *et al.*, 2023).

Poliuretano (PUR)

El estudio de degradación de PUR ha incluido también bacterias, hongos y consorcios aislados de diferentes ambientes.

Su *et al.* en 2023 probaron la degradación de película de PUR por tres consorcios microbianos provenientes de lixiviado de un vertedero. El consorcio más eficiente, que contiene *Pseudomonas* en mayor porcentaje, acumuló gran cantidad de biomasa en una semana. También identificaron las enzimas mayormente secretadas durante la biodegradación de PUR, las cuales fueron esterasas y ureasas.

También han sido evaluadas bacterias aisladas de microbiomas intestinales, por ejemplo, la bacteria *Serratia* sp., aislada del intestino de la mantis asiática (*Hierodula patellifera*) (Kim *et al.*, 2022). En este estudio, se determinó la degradación de espuma de PUR comercial por la bacteria, un porcentaje de 23.95 % después de 2 semanas de incubación. También probaron una lipasa recombinante aislada de la misma bacteria en un sustrato similar al PUR, obteniendo un porcentaje de degradación del 78.35 %.

Los hongos también han sido estudiados para la degradación de PUR, Khan *et al.* en 2017, aislaron una cepa de *Aspergillus tubingensis* del suelo de un vertedero de desechos urbanos, este hongo demostró capacidad para degradar PUR por medio de su adhesión, crecimiento de sus hifas, propagación en la superficie del plástico y finalmente secreción de enzimas degradadoras.

Poliestireno (PS)

El PS es uno de los plásticos más difíciles de degradar, debido a su estructura química, que contiene restos de fenilo unidos a largas cadenas de alcanos.

Kim *et al.* en 2021, aislaron dos bacterias de suelos de campus universitarios, *Pseudomonas lini* JNU01 y *Acinetobacter johnsonii* JNU01, las cuales son aptas para degradar microplásticos de PS por medio de la colonización superficial.

Las *Pseudomonas* podrían ser un organismo con un importante papel en la degradación de PS, ya que otra la cepa, la bacteria *Pseudomonas* sp. DSM 50071, aislada del intestino del supergusano (*Zophobas atratus*) ha demostrado también biodegradar el PS por medio de la colonización superficial y secreción de una serina hidrolasa (Kim *et al.*, 2020).

Recientemente, Liu *et al.* (2023), publicaron el primer reporte de biodegradación de PS por medio de bacterias marinas aisladas de residuos plásticos recolectados de un área de manglar. Diversas bacterias aisladas de *Novosphingobium*, *Gordonia*, *Stappia*, *Mesobacillus*, *Alcanivorax*, *Flexivirga*, *Cytobacillus*, *Thioclava*, y *Thalassospira* mostraron porcentajes de degradación de entre 2.66 y 7.73 % en un mes.

Conclusiones

Los recientes estudios sobre plásticos en salud humana son una alerta temprana para que el país atienda esta problemática. Al igual que con los plásticos, para los microplásticos tampoco existe una Ley Federal ni General que los regule. Las Leyes actuales de México regulan el desecho solo de grandes generadores de plásticos, pero es necesario que se regule la fabricación, uso y destino final de microplásticos. Esperemos que, así como la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal sirvió de base para que las demás entidades prohibieran la entrega de bolsas, popotes y empaque, también sirva para legislar los microplásticos. La perspectiva es que pronto se promulgue una Ley Federal, General o se adicione a alguna Ley ya existe la regulación de manejo de residuos plásticos y microplásticos.

Por otro lado, la biotecnología nos otorga un sinfín de herramientas para poder contrarrestar la contaminación plástica,

como el uso de microorganismos o enzimas. Es necesario invertir en investigación y tecnología para escalar estos procesos y poder disminuir la contaminación que ya aqueja al planeta.

Agradecimientos

A CONACHYT por el Proyecto A1-S-47929, el Proyecto ProNacEs de Soberanía Alimentaria 321295 y la beca de doctorado otorgada a Leticia Narciso Ortiz (CVU 858149).

Referencias

A/76/462/Add.2 (2021). Promotion and protection of human rights: human rights questions, including alternative approaches for improving the effective enjoyment of human rights and fundamental freedoms. Human Rights Advancement. A/76/462/Add.2
<https://digitallibrary.un.org/record/395070?ln=es&v=pdf>

Barragán-Ocaña, A., Silva-Borjas, P., Olmos-Peña, S., y Polanco-Olguín, M. (2020). Biotechnology and bioprocesses: Their contribution to sustainability. Processes, 8(4), 436.
<https://doi.org/0.3390/pr8040436>

Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V., y Uricchio, V. F. (2020). A detailed review study on potential effects of microplastics and additives of concern on human health. International journal of environmental research and public health, 17(4), 1212.
<https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>

Declaratoria Xitla (2022). 1er Encuentro "Libérate del Plástico-break free from plastic - México".
https://www.fronterascomunes.org.mx/pdf/Declaratoria_Xitla.pdf

DOF 01-02-2013 (2013). NOM-161-SEMARNAT-2011. Que establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo.

https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5286505&fecha=01/02/2013#gsc.tab=0

DOF 01-04-2024 (2024). Ley General de Cambio Climático.
<https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC.pdf>

DOF 08-05-2023 (2023). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.
<https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPGIR.pdf>

DOF 20-05-2021 (2021). Ley Federal de Responsabilidad Ambiental
https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LFRA_200521.pdf

DOF 15-04-2025 (2025). Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos
<https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/CPEUM.pdf>

DOF 29-05-2023 (2023). Ley General de Salud.
<https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGS.pdf>

Domínguez, J. A., Duarte, J. F. V., Fonseca, F. R., y Espitia, S. M. (2020). VII. La economía verde en el desarrollo empresarial del siglo XXI. Revista de Investigación Transdisciplinaria en Educación, Empresa y Sociedad-ITEES, 2(2), 1-44. ISSN: 2711-1857 (En línea)

Gaceta del Senado (2017). Iniciativa con Proyecto de Decreto por el que se reforma el Artículo 7 de La Ley General Para La Prevención y Gestión Integral De Los Residuos.
https://www.senado.gob.mx/65/gaceta_de_l_senado/documento/70198

Gaceta Oficial de la CDMX (2023). Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal.
<https://www.congresocdmx.gob.mx/media/documentos/5e9cfdc1fa63fdf6120fd92f434a3e407d58af30.pdf>

Gavrilescu, M. (2010). Environmental biotechnology: achievements, opportunities and challenges. Dynamic biochemistry, process biotechnology and

molecular biology, 4(1), 1-36.

[http://www.globalsciencebooks.info/Online/GSBOnline/images/2010/DBPBM/B_4\(1\)/DBPBM_B_4\(1\)1-36o.pdf](http://www.globalsciencebooks.info/Online/GSBOnline/images/2010/DBPBM/B_4(1)/DBPBM_B_4(1)1-36o.pdf)

Giacomucci, L., Raddadi, N., Soccio, M., Lotti, N., y Fava, F. (2020). Biodegradation of polyvinyl chloride plastic films by enriched anaerobic marine consortia. *Marine environmental research*, 158, 104949.

<https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.104949>

H. Congreso del Estado de Oaxaca (2023). Iniciativa con Proyecto de Decreto por el que la LXV Legislatura Constitucional del H. Congreso del Estado de Oaxaca propone al Congreso de la Unión Reforma por la cual se adiciona un segundo párrafo a la fracción VI del Artículo 7 de La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.

<https://www.congresoxxaca.gob.mx/doc/s65.congresoxxaca.gob.mx/gaceta/20230322a/18.pdf>

Habib, S., Iruthayam, A., Abd Shukor, M. Y., Alias, S. A., Smykla, J., y Yasid, N. A. (2020). Biodeterioration of untreated polypropylene microplastic particles by Antarctic bacteria. *Polymers*, 12(11), 2616.

<https://doi.org/10.3390/polym12112616>

Hou, L., Xi, J., Liu, J., Wang, P., Xu, T., Liu, T. y Lin, Y. B. (2022). Biodegradability of polyethylene mulching film by two *Pseudomonas* bacteria and their potential degradation mechanism. *Chemosphere*, 286, 131758.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131758>

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) (2019). Informe Anual 2019. <https://doi.org/10.24850/i-imta-2019-01>

Jeon, J. M., Park, S. J., Choi, T. R., Park, J. H., Yang, Y. H., y Yoon, J. J. (2021). Biodegradation of polyethylene and polypropylene by *Lysinibacillus* species JJY0216 isolated from soil grove. *Polymer Degradation and Stability*, 191, 109662.

<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109662>

Kang, B. R., Kim, S. B., Song, H. A., y Lee, T. K. (2019). Accelerating the biodegradation of high-density polyethylene (HDPE) using *Bjerkandera adusta* TBB-03 and lignocellulose substrates. *Microorganisms*, 7(9), 304.

<https://doi.org/10.3390/microorganisms7090304>

Khan, S., Nadir, S., Shah, Z. U., Shah, A. A., Karunarathna, S. C., Xu, J. y Hasan, F. (2017). Biodegradation of polyester polyurethane by *Aspergillus tubingensis*. *Environmental pollution*, 225, 469-480.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.03.012>

Kim, J. H., Choi, S. H., Park, M. G., Park, D. H., Son, K. H., y Park, H. Y. (2022). Polyurethane biodegradation by *Serratia* sp. HY-72 isolated from the intestine of the Asian mantis *Hierodula patellifera*. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1005415.

<https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1005415>

Kim, H. W., Jo, J. H., Kim, Y. B., Le, T. K., Cho, C. W., Yun, C. H., y Yeom, S. J. (2021). Biodegradation of polystyrene by bacteria from the soil in common environments. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 126239.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126239>

Kim, H. R., Lee, H. M., Yu, H. C., Jeon, E., Lee, S., Li, J., y Kim, D. H. (2020). Biodegradation of polystyrene by *Pseudomonas* sp. isolated from the gut of superworms (larvae of *Zophobas atratus*). *Environmental science & technology*, 54(11), 6987-6996.

<https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01495>

Leslie, H. A., Van Velzen, M. J., Brandsma, S. H., Vethaak, A. D., Garcia-Vallejo, J. J., y Lamoree, M. H. (2022). Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment international*, 163, 107199.

<https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107199>

Li, Z., Wei, R., Gao, M., Ren, Y., Yu, B., Nie, K., y Liu, L. (2020). Biodegradation of low-density polyethylene by *Microbulbifer*

hydrolyticus IRE-31. Journal of environmental management, 263, 110402. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110402>

Liu, R., Zhao, S., Zhang, B., Li, G., Fu, X., Yan, P., y Shao, Z. (2023). Biodegradation of polystyrene (PS) by marine bacteria in mangrove ecosystem. Journal of Hazardous Materials, 442, 130056. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130056>

Lou, Y., Ekaterina, P., Yang, S. S., Lu, B., Liu, B., Ren, N. y Xing, D. (2020). Biodegradation of polyethylene and polystyrene by greater wax moth larvae (*Galleria mellonella* L.) and the effect of co-diet supplementation on the core gut microbiome. Environmental science & technology, 54(5), 2821-2831. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07044>

Narciso-Ortiz, L., Coreño-Alonso, A., Mendoza-Olivares, D., Lucho-Constantino, C. A., y Lizardi-Jiménez, M. A. (2020). Baseline for plastic and hydrocarbon pollution of rivers, reefs, and sediment on beaches in Veracruz State, México, and a proposal for bioremediation. Environmental Science and Pollution Research, 27, 23035-23047. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08831-z>

Narciso-Ortiz, L., Peña-Montes, C., Peralta-Pelaez, L. A., Fernández-Romero, F., Anzures-Jacinto, M. L., Sulbarán, B. C., y Pacheco-Rivera, K. M. (2024). PET-degrading microorganisms isolated from residues of the SAV biosphere reserve and identification of carboxylic ester hydrolase activity during their growth in the presence of polymer. Applied Environmental Biotechnology, 9(1). ISSN 2424-9092. <https://www.udspub.com/aij/public/index.php/aeb/article/view/1841>

Osuna-Laveaga, D. R., Ojeda-Castillo, V., Flores-Payán, V., Gutiérrez-Becerra, A., y Moreno-Medrano, E. D. (2023). Micro-and nanoplastics current status: legislation, gaps, limitations and socio-economic prospects for future. Frontiers in Environmental Science. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.1071>

99

Peng, B. Y., Chen, Z., Chen, J., Yu, H., Zhou, X., Criddle, C. S. y Zhang, Y. (2020). Biodegradation of polyvinyl chloride (PVC) in *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) larvae. Environment International, 145, 106106. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106106>

Plastic Europe (2024). Plastics – the Facts 2024, 1, <https://plasticseurope.org/es/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2024/>

Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, V., Carnevali, O. y Giorgini, E. (2021). Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. Environment international, 146, 106274. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>

Saeed, S., Iqbal, A., y Deebea, F. (2022). Biodegradation study of Polyethylene and PVC using naturally occurring plastic degrading microbes. Archives of Microbiology, 204(8), 497. <https://doi.org/10.1007/s00203-022-03081-8>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2023a). Residuos marinos y contaminación plástica. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos-marinos-y-contaminacion-plastica>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2023). Inventario Nacional de Fuentes de Contaminación Plástica. https://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/2023/NFCP_2023.pdf

Sharma, I. (2020). Bioremediation techniques for polluted environment: concept, advantages, limitations, and prospects. In Trace metals in the environment-new approaches and recent advances. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90453>

Sistema de Información Legislativa (2013). De la Comisión de Medio Ambiente y Recursos Naturales, con proyecto de Decreto que Reforma y Adiciona diversas disposiciones de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
http://sil.gobernacion.gob.mx/Archivos/Documentos/2013/04/asun_2960966_20130403_1364921851.pdf

Sistema de Información Legislativa (2019). Iniciativa que reforma los Artículos 269 y 421 bis de la Ley General de Salud, suscrita por el diputado Raúl Gracia Guzmán e integrantes del grupo parlamentario del PAN.
http://sil.gobernacion.gob.mx/Archivos/Documentos/2019/10/asun_3936778_20191015_1571170363.pdf

Sistema de Información Legislativa (2020). Iniciativa que adiciona el Artículo 269 de la Ley General de Salud, suscrita por las diputadas Julieta Macías Rábago e Irma Juan Carlos, de los grupos parlamentarios de Movimiento Ciudadano y MORENA.
http://sil.gobernacion.gob.mx/Archivos/Documentos/2020/02/asun_4009153_20200227_1582832039.pdf

Solleiro-Villavicencio, H., Gomez-De León, C. T., Del Río-Araiza, V. H., y Morales-Montor, J. (2020). The detrimental effect of microplastics on critical periods of development in the neuroendocrine system. *Birth Defects Research*, 112(17), 1326-1340.
<https://doi.org/10.1002/bdr2.1776>

Su, T., Zhang, T., Liu, P., Bian, J., Zheng, Y., Yuan, Y. y Qi, Q. (2023). Biodegradation of polyurethane by the microbial consortia enriched from landfill. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 107(5), 1983-1995.
<https://doi.org/10.1007/s00253-023-12418-2>

Sui, B., Wang, T., Fang, J., Hou, Z., Shu, T., Lu, Z. y Zhu, Y. (2023). Recent advances in the biodegradation of polyethylene terephthalate with cutinase-like enzymes. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1265139.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1265139>

UNEP/EA.5/Res.14 (2022). Resolución aprobada por la Asamblea de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente el 2 de marzo de 2022.
<https://wedocs.unep.org/rest/api/core/bitstreams/8b993d59-e620-44dd-9bd8-40278b8428a5/content>

Vázquez-Alcántara, L., Oliart-Ros, R. M., García-Bórquez, A., y Peña-Montes, C. (2021). Expression of a cutinase of *Moniliophthora roreri* with polyester and PET-plastic residues degradation activity. *Microbiology Spectrum*, 9(3), e00976-21.
<https://doi.org/10.1128/Spectrum.00976-21>

Yang, S. S., Ding, M. Q., He, L., Zhang, C. H., Li, Q. X., Xing, D. F. y Wu, W. M. (2021). Biodegradation of polypropylene by yellow mealworms (*Tenebrio molitor*) and superworms (*Zophobas atratus*) via gut-microbe-dependent depolymerization. *Science of The Total Environment*, 756, 144087.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144087>

Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y. 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>

Zhang, J., Gao, D., Li, Q., Zhao, Y., Li, L., Lin, H. y Zhao, Y. (2020). Biodegradation of polyethylene microplastic particles by the fungus *Aspergillus flavus* from the guts of wax moth *Galleria mellonella*. *Science of the Total Environment*, 704, 135931.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135931>