



Plastificantes bajo la lupa: toxicidad y la promesa de la biorremediación

¹Marcia Torres Hernández, ²José Luis Torres García, ²Carlos Guerrero Urrutia, ³Miriam Ahuactzin Pérez, ¹Dora Luz Corona Quintanilla, ²Diana Verónica Cortés Espinosa

¹Centro Tlaxcala de Biología de la Conducta, Universidad Autónoma de Tlaxcala, La Loma Xicohtencatl, Santa María Acuitlapilco, 90006. Tlaxcala, México.

²Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Tlaxcala. Ex-Hacienda San Juan Molino, Carretera Estatal Santa Inés Tecuexcomac-Tepetitla Km. 1.5, C.P. 90700. Tlaxcala, México.

³Facultad de Agrobiología, Universidad Autónoma de Tlaxcala, Ixtacuixtla de Mariano Matamoros, 90120, Tlax.

Resumen

Los plastificantes como el di(2-etilhexil) ftalato (DEHF), el bisfenol A (BFA) y el bisfenol S (BFS) son compuestos ampliamente utilizados en la fabricación de polímeros cuya creciente producción y uso ha generado una problemática ambiental y sanitaria de alcance global. Estos contaminantes presentan alta persistencia ambiental, capacidad de bioacumulación y biomagnificación, lo que favorece su incorporación en las cadenas tróficas y la exposición continua en humanos, actuando como disruptores endocrinos que provocan efectos adversos sobre la función reproductiva, metabólica, hepática e inmunológica, incluso a bajas concentraciones. Ante esta problemática, la biorremediación emerge como una alternativa sostenible y eficiente para su eliminación en matrices ambientales. Este artículo revisa los principales mecanismos de biomagnificación y toxicidad asociados a DEHF, BFA y BFS, así como las estrategias biotecnológicas empleadas para su degradación, reportando porcentajes de remoción superiores al 90% en diversos sistemas biológicos y destacando el potencial de microorganismos y enzimas específicas como herramientas clave en la mitigación de esta contaminación.

Palabras clave: Plastificantes, biomagnificación, toxicidad y biorremediación



Abstract

Plasticizers such as di(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP), bisphenol A (BPA), and bisphenol S (BPS) are compounds widely used in polymer manufacturing, whose growing production and use have generated a global environmental and health problem. These contaminants exhibit high environmental persistence, bioaccumulation capacity, and biomagnification, which favors their incorporation into food chains and continuous exposure in humans, acting as endocrine disruptors that cause adverse effects on reproductive, metabolic, hepatic, and immunological functions, even at low concentrations. In response to this issue, bioremediation emerges as a sustainable and efficient alternative for their removal from environmental matrices. This article reviews the main mechanisms of biomagnification and toxicity associated with DEHP, BPA, and BPS, as well as the biotechnological strategies employed for their degradation, reporting removal percentages above 90% in various biological systems and highlighting the potential of microorganisms and specific enzymes as key tools in mitigating this contamination.

Keywords: Plasticizers, biomagnification, toxicity, and bioremediation



Introducción

En el siglo XXI la contaminación por plásticos se ha convertido en un problema mundial de suma importancia, estos se han convertido en uno de los materiales más usados en nuestra sociedad moderna, debido a su flexibilidad, durabilidad, rentabilidad y resistencia (Mabadahanye et al. 2025), características que han revolucionado la industria de la odontología, productos para bebés, construcción, entre otras. lo que ha dado lugar a la circulación mundial de la contaminación por estos, incluso en las regiones más remotas (Sharma et al. 2025).

En la actualidad no se podría imaginar una vida sin plásticos, aunque el conocimiento sobre el tiempo que estos tardan en degradarse por completo no es del todo conocido (Millet et al. 2018). Existen dos clases de polímeros que conforman a los plásticos, los termoplásticos y los termoestables, según su reactividad a la temperatura. Los termoestables tienen la capacidad de reutilizarse o remodelarse después de estar expuestos al calor, contrario a los termoplásticos que no cuentan con esta capacidad (Mabadahanye et al. 2025).

Uno de los plastificantes más comunes son los ftalatos, el ejemplo más conocido, el di (2-etilhexil) ftalato (DEHF) que tiene como objetivo, proporcionar flexibilidad, maleabilidad y durabilidad a los plásticos, como el poliéster o el cloruro de polivinilo (Liu et al., 2023). Por otro lado, se encuentran el Bisfenol A (BFA) y el bisfenol S (BFS) que son productos químicos industriales muy utilizados, como monómeros para fabricación del plástico. (Beltifa et al. 2017). Estos tres compuestos, son de los productos químicos con mayor volumen de disponibilidad al usarse en botellas, biberones, instrumentación médica, tubería, papel térmico etc. (Figura 1). Las características fisicoquímicas de estos compuestos como su estabilidad química, su afinidad por la materia orgánica, su distinta solubilidad y su capacidad para migrar desde la matriz polimérica debido a que no están unidos covalentemente al plástico favorecen su liberación al ambiente y su distribución en agua, suelo y sedimentos (Ismail et al., 2022). Los principales factores de su liberación se deben a la exposición ambiental a diferentes temperaturas, cambios de pH, exposición a luz UV, el método de procesamiento, entre otras (Figura 1).

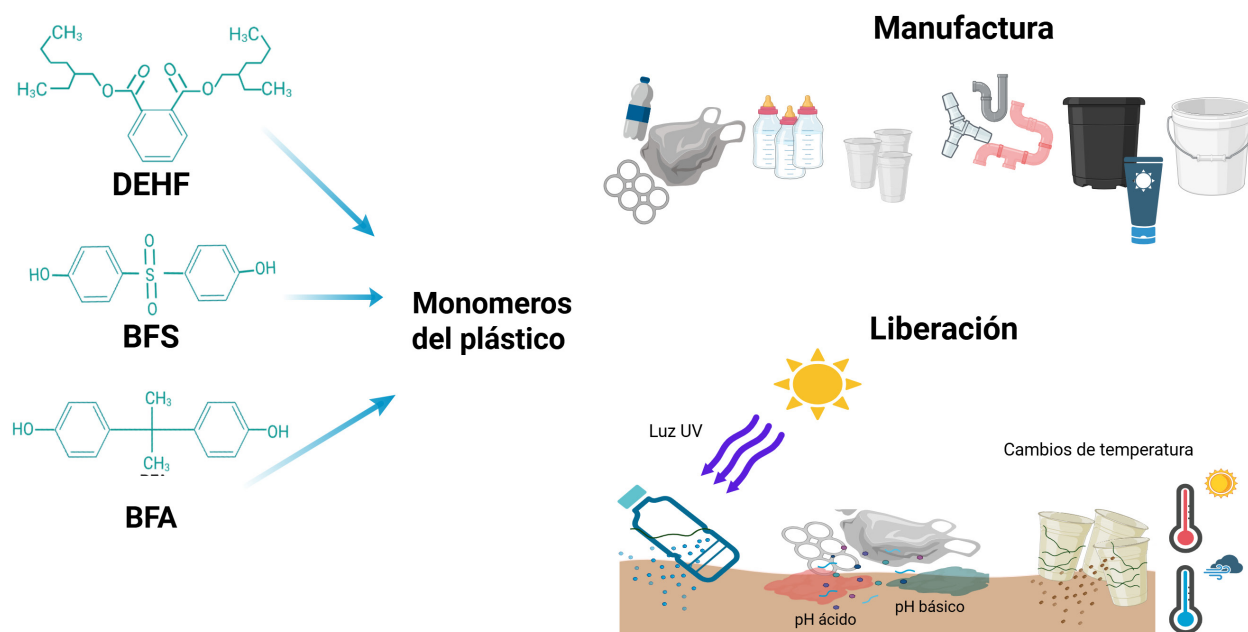


Figura 1. Principales monómeros del plástico, su manufactura y factores de liberación a matrices ambientales. Creación propia

Los plastificantes se convierten en una serie de moléculas más tóxicas que las originales, afectando de manera directa a la matriz ambiental y filtrándose a los productos que almacenan, afectando las poblaciones expuestas (Zeng-Jin *et al.* 2022). La exposición a estos contaminantes ya sea dérmica, oral o inhalatoria, puede causar enfermedades cardiovasculares, efectos negativos en la reproducción y desarrollo, también causa bioacumulación en la unidad materno-fetal-placentaria, daño hepático, disfunción de las células β del páncreas, entre otras (Dallio *et al.*, 2018; Štefunková *et al.*, 2024; Lesser *et al.*, 2018). Al ser un problema ambiental, social y de salud, se buscan tecnologías de eliminación, como la biorremediación. Investigaciones recientes sugieren que la biodegradación es el método más prometedor para eliminar los plastificantes y polímeros del plástico del ambiente. La biodegradación tiene ventajas de bajo costo, baja contaminación secundaria y la idoneidad para la reparación *in situ* a gran escala (Kou *et al.*, 2023).

Biomagnificación

La biomagnificación es el proceso por el cual la concentración de compuestos químicos aumenta progresivamente en un organismo, acumulándose en el organismo debido a su persistencia, difícil degradación, la dinámica ascendente en la cadena trófica y el flujo del compuesto tóxico (Uddin *et al.*, 2021). En este contexto, la exposición a compuestos tóxicos como los plastificantes genera consecuencias graves en la salud de los seres vivos, ya que pueden ser absorbidos y dispersarse fácilmente. Lo que provoca disfunciones corporales, bioacumulación relacionada con la edad y biomagnificación en las redes tróficas, alcanzando concentraciones más elevadas (Sharma *et al.*, 2024).

Existe la exposición generalizada de plastificantes a partir de diversas fuentes, Se conocen tres fuentes de exposición con humanos que puede ser a través de vía oral por el consumo de alimentos y bebidas contaminadas, absorción cutánea por el uso de productos de cuidado personal, materiales de construcción y dispositivos médicos (Sieck *et al.*, 2024; Goyal *et al.*, 2024). contacto prolongado a los plastificantes, por exposición ocupacional e inhalación de partículas en el aire (Figura 2), exposiciones que pueden repercutir a nivel fetal durante el proceso de gestación (Shah *et al.*, 2024; Sharma *et al.*, 2024).



Los rayos solares y la alcalinidad o acidez del ambiente hacen que los vertederos se calienten, liberando BFA al ambiente, donde migra a través de los horizontes del suelo y se lixivia en los acuíferos y aguas subterráneas (Figura 2) (Aziz *et al.*, 2018). La presencia de este contaminante en el suelo no solo impacta en la infertilidad, sino, en funciones específicas de un ecosistema, al reducir la diversidad y la actividad del microbioma del suelo, además, aumenta el riesgo para la salud de los cultivos a través de la bioacumulación (Hu *et al.*, 2023). El BFA también se bioacumula en los consumidores primarios al alimentarse de productos que previamente acumularon BFA en sus tejidos, en el cuerpo humano, el BFA se incorpora a través del consumo de carne, leche u otros subproductos (Figura 2) (Torres-García *et al.*, 2022).

Estos contaminantes son un tóxico-emergente y de gran preocupación; ya que tienen la capacidad de bioconcentrarse, lo que se define como la capacidad para aumentar progresivamente su concentración en células o tejidos y de esta manera provocar daños en la salud y el ambiente (Lesser *et al.*, 2018).

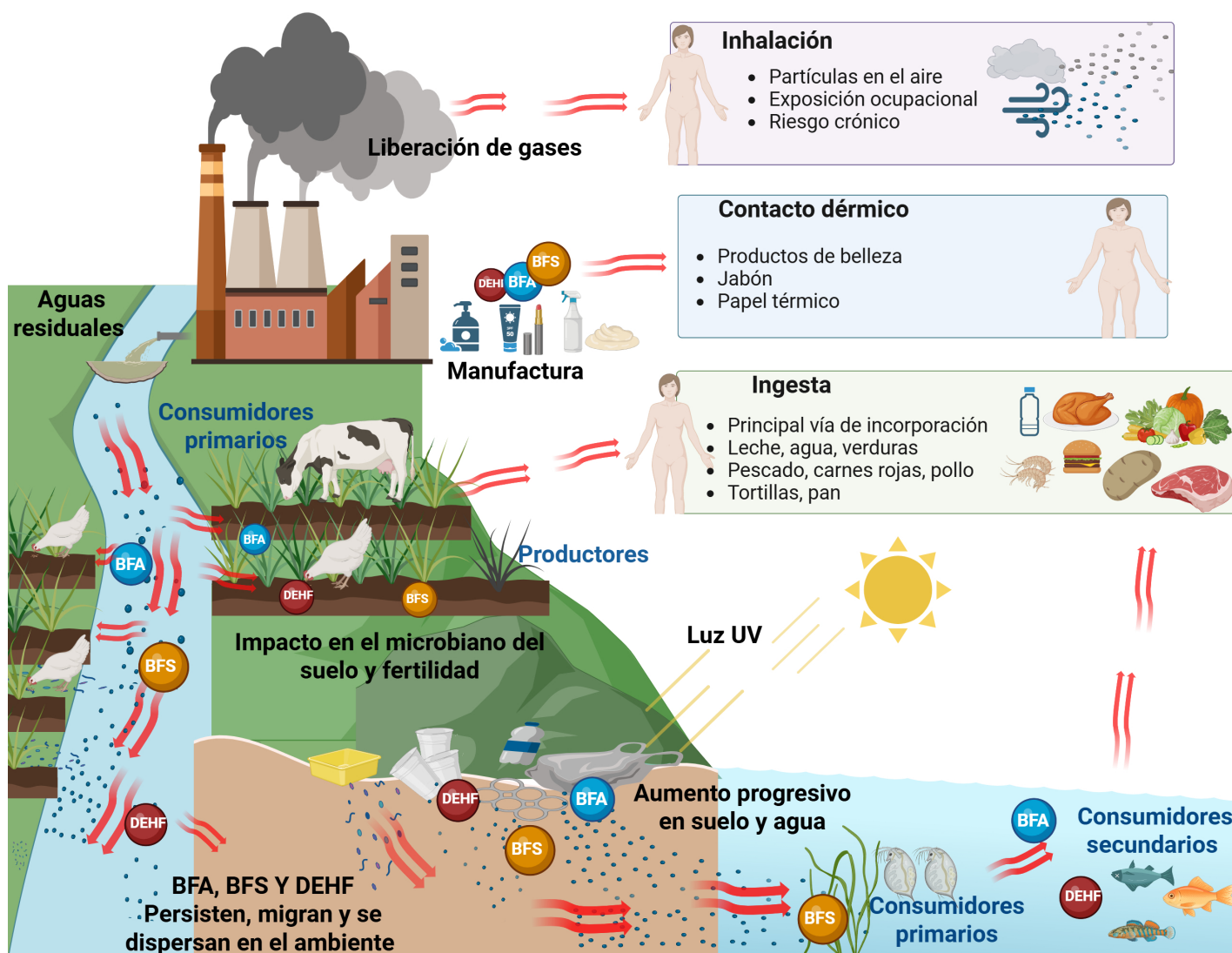


Figura 2. Biomagnificación de los plastificantes (BFA, BFS y DEHF) y vías de exposición humana. Creación propia

Toxicidad de plastificantes

La toxicidad potencial de los plastificantes y sus posibles sustitutos es un problema de gran magnitud. Se sabe que los plastificantes tienen efectos adversos en la salud humana, debido a la exposición a productos que contienen estos contaminantes, incluso a bajas concentraciones, pues se ha confirmado la detección de sus metabolitos en los fluidos y tejidos corporales (leche materna, sangre, orina, semen) (Kumari et al., 2020; Liu *et al.*, 2019; Carolina de Almeida *et al.*, 2023). Los plastificantes y sus polímeros están clasificados como disruptores endocrinos, ya que estos son de naturaleza xenostrogénica y pueden unirse a receptores hormonales específicos o interfieren en el metabolismo de estos.

Con respecto a su toxicidad específica (Figura 3), el DEHF es un contaminante potencialmente tóxico para la reproducción, ya que inhibe la síntesis de testosterona en los testículos y afecta el desarrollo de los órganos reproductores masculinos (Liu *et al.*, 2019). Resultados *in vitro* han reportado que pueden afectar las funciones de las células espermáticas y directamente a los embriones, ya que afecta el desarrollo y función de la placenta, reduciendo el transporte de nutrientes y oxígeno, irritación ocular por la exposición a vapores o polvos, y cambios constituyentes en las células sanguíneas por el aumento en la fragilidad hemolítica (De Almeida *et al.*, 2023). Por otro lado, la materia prima de los plásticos, los bisfenoles, en específico

el BFA es uno de los polímeros más estudiados. Este contaminante es clasificado como mutagénico, con capacidad para causar metilación del ADN; inmunotóxico, ya que puede alterar el balance entre linfocitos T reguladores y linfocitos T efectores, lo que genera respuestas exageradas; y hepatotóxico, ya que favorece la acumulación de lípidos dentro de los hepatocitos (hígado graso no alcohólico) (Figura 3) (Ruberto *et al.*, 2022). Tiene actividad estrogénica mostrando otros modos de acción, al producir daño hepático, disrupción de la función de las células β del páncreas, disrupción de la tiroides para producir la hormona tiroidea y aumento de peso, que promueve la obesidad (Lesser *et al.*, 2018). De la misma forma puede causar problemas cardiovasculares, problemas reproductivos, problemas con el desarrollo de la glándula mamaria, baja producción de espermatozoides, restricción del crecimiento fetal, ansiedad y depresión (Štefunková *et al.*, 2024).

El BFS, análogo del BFA, contribuye a la alteración endocrina general, ya que la activación de estos receptores afecta a la expresión de ciertas enzimas implicadas en el metabolismo de las hormonas endógenas (Kodila *et al.*, 2023). Investigaciones recientes han revelado cuestiones controvertidas sobre los mecanismos tóxicos del BFS, especialmente en mujeres embarazadas y lactantes, así como inducción de la muerte celular apoptótica mediada por la caspasa-3 de las células MRC5 y BEAS-2B del epitelio bronquial humano (Abouhamzeh *et al.*, 2023). Los análogos como el BFS y el BFF promueven la acumulación de grasa en los adipocitos, así como la homeostasis de la glucosa y la insulina en roedores, también promueven efectos obesogénicos de una manera más elevada que el propio BFA (Figura 3) (Alharbi *et al.*, 2022). Por estas razones, las investigaciones centradas en la degradación de plastificantes también se han centrado en buscar estrategias de biorremediación para la eliminación de estos dos análogos del BFA.

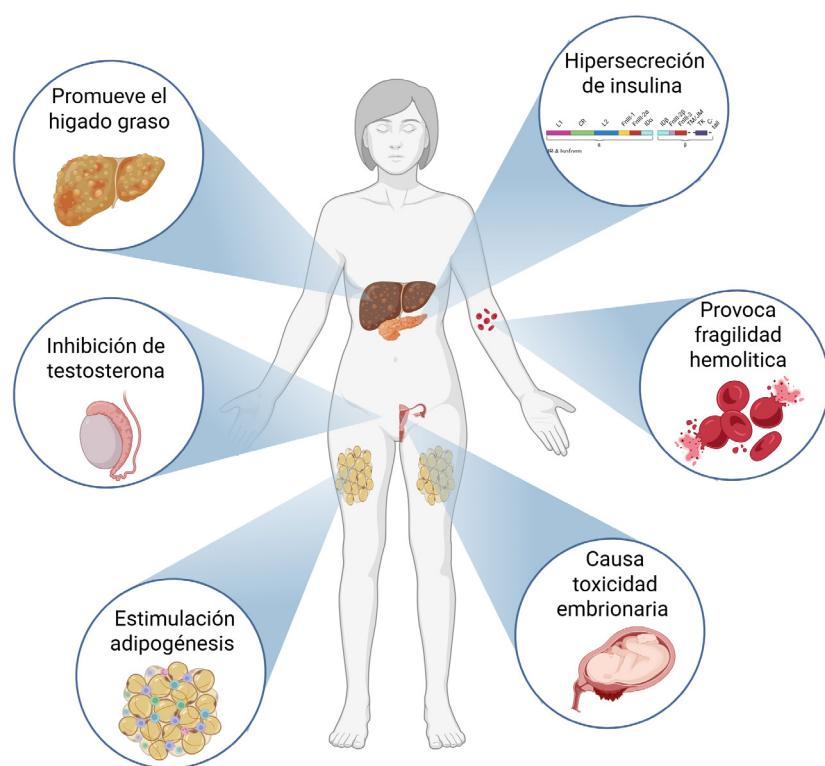


Figura 3. Toxicidad específica de plastificantes (BFA, BFS, DEHF) en la salud humana. Creación propia

Tecnologías de biorremediación

Debido a la contaminación, la biomagnificación y la toxicidad de los plastificantes se han buscado soluciones sostenibles como la biorremediación. Los métodos disponibles para la remediación pueden agruparse en tres categorías: químicos, físicos y biológicos.

La remediación química es un método que puede ofrecer alternativas rápidas y agresivas que no son sensibles a la concentración del contaminante y pueden ofrecer un tratamiento alternativo para superar algunas limitaciones de la biorremediación. El método químico implica la aplicación de productos químicos en el proceso de remediación del suelo y puede realizarse *in situ* o *ex situ*, incluye el aumento químico, la lixiviación química y la oxidación.

La remediación física, utiliza barreras físicas y mecánicas para aislar, recuperar y separar los contaminantes. Este tipo de método incluye, el recubrimiento, la sustitución del suelo, el lavado del suelo y la desorción térmica. Presentan limitaciones fisicoquímicas relacionadas con la distribución de los contaminantes, la sorción, la transferencia de masa y el suministro, mezcla de residuos y catalizadores (Sharma *et al.*, 2024).

La remediación biológica o biorremediación aprovecha la capacidad metabólica de diferentes organismos (plantas, algas, bacterias, hongos o levaduras) para descomponer, transformar o degradar compuestos químicos tóxicos o inertes, como los plastificantes. Se define como un proceso que utiliza organismos vivos o su catálisis para incrementar la velocidad o el alcance de la destrucción de contaminantes, constituyendo un componente viable dentro de la tecnología de gestión de residuos peligrosos, cuyo objetivo principal es reducir la exposición de los organismos y de los entornos receptores a los efectos adversos de los contaminantes ambientales. De este modo, ofrece una alternativa económica,

eficiente y natural en comparación con los métodos físicos o químicos convencionales (Tabla 1) (Romero Silva, 2025).

La biorremediación puede aplicarse directamente en el sitio contaminado (*in situ*) o fuera de él (*ex situ*), dependiendo de las características del contaminante y de la matriz afectada. Esta tecnología comprende diversas estrategias biológicas, entre ellas la fitorremediación, la micorremediación y la remediación microbiana, que han demostrado ser alternativas sostenibles para la remoción de contaminantes debido a su menor impacto ambiental, menor costo operativo y elevada eficiencia frente a diversos compuestos

	Ventajas	Desventajas
Químicas	• Alternativas rápidas y agresivas. • No es sensible a la concentración del contaminante.	• Aplicación de productos químicos, impactos secundarios. • Subproductos no deseados. • Mayores costos operativos
Físicas	• Utiliza barreras físicas y mecánicas para aislar. • Contención inmediata del contaminante.	• Problemas asociados a la sorción y transferencia de masa. • Limitaciones en el suministro y mezcla de residuos y catalizadores.
Biológicas	• Aprovecha la capacidad metabólica de microorganismos (plantas, algas, bacterias, hongos o levaduras). • Incrementa la velocidad o el alcance de la destrucción de contaminantes. • Alternativa económica, eficiente y natural. • Reduce la exposición de organismos y entornos receptores a contaminantes.	• Puede ser más lenta en comparación con métodos químicos agresivos. • Requiere condiciones ambientales adecuadas.
Tecnologías de remediación		

Tabla 1. Ventajas y desventajas de tipos de biorremediación

orgánicos. (Sales da Silva et al., 2020). De manera particular, la biorremediación basada en microorganismos ha adquirido gran relevancia por su diversidad metabólica de bacterias y hongos, capaces de transformar, gradar e incluso mineralizar contaminantes orgánicos complejos. Como resultado, numerosas investigaciones se han enfocado en el aislamiento y caracterización de cepas de alto potencial degradador, sentando las bases para el desarrollo de procesos biológicos cada vez más eficientes.

Uso de microorganismos en biorremediación

Las aplicaciones de la tecnología de biorremediación implican la interacción entre diferentes grupos de microorganismos. En estos casos, la comunidad microbiana actúa como el agente activo del sistema, y el proceso se centra en optimizar su capacidad catalítica.

Esta actividad biocatalítica puede lograrse mediante la estimulación de la población microbiana autóctona o mediante la introducción de organismos con funciones catabólicas específicas. La selección de la comunidad microbiana adecuada dependerá de la naturaleza química y física del contaminante, así como del compartimento ambiental en el que se encuentre (Alidoosti et al., 2024).

Existe el uso de enzimas como las esterasas, lignina peroxidasa, el citocromo P450, citocromo c oxidasa de tipo cbb3, lacasas y manganoso peroxidasa, que se han reportado por su participación específica dentro del proceso de degradación de diversos plastificantes (Shah et al., 2024; Wang et al., 2022; Tian et al., 2024; Liu et al., 2023).

En los últimos años, se ha descrito una amplia diversidad de microorganismos capaces de degradar plastificantes específicos, como DEHF, mono di (2-etilhexil) ftalato (MEHF), BFA y BFS. Para lograr esto las cepas pueden emplear desesterificación, hidrolización, betaoxidación de las cadenas laterales alquílicas, oxidación-reducción, desmetilación, biotransformación, hidroxilación, deshidratación, deshidrogenación, carboxilación, para degradar los compuestos. (Shah et al., 2024; Wang et al., 2022; Liu et al., 2023).



Las cepas individuales junto con los consorcios bacterianos y los factores abióticos facilitan la mineralización, asimilación, despolimerización y fragmentación de los residuos plásticos del ambiente en dióxido de carbono, nitrógeno, metano, monómeros, dímeros, oligómeros y agua (Agarwal *et al.*, 2024). Algunos microorganismos usados como cepa individual o en consorcios bacterianos se enlistan en la Tabla 2, donde se

Menciona el tipo de plastificante que se evaluó para la biorremediación de cada compuesto con cada cepa en específico. Esta información es el sustento en donde la biorremediación con base en microorganismos beneficia enormemente a la eliminación de contaminantes de las matrices ambientales, disminuye la presencia de estos y logra degradarlas en compuestos menos tóxicos para los humanos.

Plastificante	Microorganismos	% Degradación / Remoción	Condiciones reportadas	Referencia
DEHF	<i>Rhodococcus pyridinivorans</i> , <i>Gordonia sp</i> , <i>Microbacterium sp.</i>	92–98%	92–98%	Shah et al., 2024
DEHF	<i>Aspergillus nidulans</i> , <i>Aspergillus niger</i> , <i>Rizopus nigricans</i>	Orina (20 días): 91.7%, 88.2%, 90.9%. Sangre (20 días): 55.0%, 50.0%, 54.5%	20 días	Ali et al., 2023
DEHF	<i>Mycolicibacterium sp.</i>	100%	52 h	Bhattacharyya et al., 2023
BFA	<i>Phanerochaete sordida</i> YK-624	100% por ciclo (≥9 ciclos)	12 h por ciclo	Wang et al., 2022
BFA	<i>Pseudomonas asiatica</i> P1	96.89%	120 h	Tian et al., 2024
BFA	<i>Myrothecium roridum</i>	92% (con CuSO4)	48 h	Jasińska et al., 2021
BFA	<i>Trametes hirsuta</i> La-7	85.71% (in vitro)	6 h	Liu et al., 2023
BFA	<i>Paraconiothyrium Brasiliense</i> HMA1	100%	10 días	Eltoukhy et al., 2023
BFS	<i>Phlebia acerina</i> S-LWZ20190614-6	96.2%	7 días	Chang et al., 2025

Tabla 2. Bacterias y hongos utilizados como degradadores de plastificantes como BFA, DEHF y BFS.

Conclusión

La persistencia y amplia distribución de plastificantes como ftalatos y bisfenoles en ambientes antropizados representa un problema ambiental y sanitario significativo, debido a su capacidad de bioacumularse y biomagnificarse, así como por sus efectos negativos sobre la salud humana incluso a bajas concentraciones. En este contexto, la biorremediación emerge como una alternativa viable, eficiente y sostenible para la mitigación de estos compuestos, al aprovechar procesos biológicos que degradan los contaminantes en productos menos tóxicos. Las estrategias *in situ* y *ex situ*, junto con el uso de microorganismos y enzimas específicas, muestran alto potencial para restaurar matrices ambientales afectadas por plastificantes, subrayando la importancia de continuar desarrollando enfoques biotecnológicos para enfrentar la contaminación por estos compuestos.

Agradecimientos

Agradecemos a la SECIHTI por la beca otorgada a MTH con número 1007872 y al Instituto Politécnico Nacional por el financiamiento al proyecto multidisciplinario SIP 20242067.

Plastificantes bajo la lupa: toxicidad y la promesa de la biorremediación

Referencias

- Abouhamzeh B, Zare Z, Mohammadi M, Moosazadeh M, Nourian A (2023) Bisphenol S influence on oxidative stress and endocrine biomarkers of reproductive system: A systematic review and meta analysis. *International Journal of Preventive Medicine*, 14.
- Agarwal T, Atray N, Sharma J (2024) Microbial bioremediation strategies for sustainable mitigation of plastic pollution. *Future Journal of Pharmaceutical Sciences*, 10.
- Alharbi F, Algonaiman R, Alduwayghiri R, Aljutaily T, Algheshairy M, Almutairi S, Alharbi M, Alfurayh A, Alshahwan A, Alsadun F, Barakat H (2022) Exposure to bisphenol A substitutes, bisphenol S and bisphenol F, and its association with developing obesity and diabetes mellitus: A narrative review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19.
- Ali M, Abdel-Rahman A, Ali I (2023) Fungal bioremediation of di-2-ethylhexyl phthalate. *Iranian Journal of Science and Technology*, 47.
- Alidoosti F, Giyahchi M, Moien S, Moghimi H (2024) Unlocking the potential of soil microbial communities for bioremediation of emerging organic contaminants: omics-based approaches. *Microbial Cell Factories*, 23.
- Aziz A, Agamuthu P, Fauziah S H (2018) Removal of bisphenol A and 2,4-Di-tert-butylphenol from landfill leachate using plant-based coagulant. *Waste Management & Research*, 36.
- Beltifa A, Feriani A, Machreki M, Ghorbel A, Ghazouani L, Di Bella G, Van Loco J, Reynolds T, Mansour H B (2017) Plasticizers and bisphenol A in packaged foods sold in the Tunisian markets: Study of their acute in vivo toxicity and environmental fate. *Environmental Science and Pollution Research*, 24.
- Chang M, Jiang H, Wang J, Yin R, Li Q, Wang N, Xiao P, Zhou L W, Xiao T (2025) Efficient degradation of bisphenol S by *Phlebia acerina*. *Bioresource Technology*, 418.
- Dallio M, Masarone M, Errico S, Gravina G, Nicolucci C, Di Sarno R, Federico A (2018) Role of bisphenol A as environmental factor in the promotion of non-alcoholic fatty liver disease: In vitro and clinical study. *Alimentary Pharmacology and Therapeutics*, 47.
- de Almeida M, Machado M, Costa G, Santos L, de Souza A, de Carvalho R (2023) Influence of different concentrations of plasticizer diethyl phthalate on toxicity. *Heliyon*, 9.
- Eltoukhy A, Mohamed H, Hassan S E D, El-Naggar N E A (2025) Biodegradation and mineralization of bisphenol A by *P. brasiliense*. *Journal of Hazardous Materials*, 488.
- Goyal S P, Agarwal T, Mishra V, Verma A, Singh R (2024) Adsorption characterization of *Lactobacillus* sp. for di-(2-ethylhexyl) phthalate. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 16.
- Hu R, Liu S, Zhao H, Wang Y, Zhang J, Chen Q (2023) Temporal microbial succession drives phase-dependent kinetics of di(2-ethylhexyl) phthalate biodegradation in soil. *Biology and Fertility of Soils*, 59.
- Ismail G A, Sakai H (2022) Bisphenol A in the environment and recent advances in biodegradation by fungi. *Chemosphere*, 291.
- Jasińska A, Soboń A, Rózalska S, Średnicka P (2021) Bisphenol A removal by the fungus *M. roridum*. *International Journal of Molecular Sciences*, 22.
- Kodila A, Franko N, Sollner Dolenc M A (2023) Review on immunomodulatory effects of BPA analogues. *Archives of Toxicology*, 97.
- Kou L, Chen H, Zhang X, Liu S, Zhang B, Zhu H (2023) Biodegradation of di(2-ethylhexyl) phthalate by a new bacterial consortium. *Water Science and Technology*, 88.
- Kumari A, Kaur R (2020) A review on morpho-physiological traits of plants under phthalates stress. *Plant Growth Regulation*, 91.
- Lesser L, Mora A, Moreau C, Mahlknecht J, Hernández-Antonio A, Ramírez A, Barrios-Piña H (2018) Survey of 218 organic contaminants in groundwater derived from the world's largest untreated wastewater irrigation system, Mezquital Valley, Mexico. *Chemosphere*, 198.
- Liu J, Sun K, Zhu R, Wang X, Waigi G, Li S (2023) Biotransformation of bisphenol A in vivo and in vitro by laccase-producing *Trametes hirsuta* La-7: Kinetics, products, and mechanisms. *Environmental Pollution*, 321.
- Liu Y, Tang B, Liu Y, Luo X, Mai B, Covaci A, Poma G (2019) Occurrence, biomagnification and maternal transfer of organophosphorus flame retardants and plasticizers. *Environment International*, 133.
- Mabadahany K, Dalu M, Munyai L, Dondofema F, Dalu T (2025) Perceptions and knowledge of water and wastewater treatment plant workers regarding plastic pollution and removal. *Sustainability*, 17.
- Millet H, Vangheluwe P, Block C, Sevenster A, Garcia L, Antonopoulos R (2018) The nature of plastics and their societal usage. *United Nations Development Programme*.
- Romero-Silva R (2025) Biorremediación, tecnología sostenible en la gestión de residuos y la contaminación por hidrocarburos. *Centro Azúcar*, 52.
- Ruberto S, Santovito A, Simula E, Murru R, Deidda F, Loi M, Banni S (2022) Bisphenols induce human genomic damage. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, 63.
- Sales da Silva I, Gomes de Almeida F, Padilha da Rocha e Silva N, Casazza A, Converti A, Asfora Sarubbo L (2020) Soil bioremediation: Overview of technologies and trends. *Energies*, 13.
- Shah A, Malhotra H, Papade E, Dhamale T, Ingale P, Kasarlawaar T, Phale S (2024) Microbial degradation of contaminants of emerging concern: Metabolic, genetic and omics insights for enhanced bioremediation. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 12.
- Sharma E, Ramachandran A, Dobriyal P, Badola S, Koldewey H, Hussain A, Badola R (2025) Mapping the distribution and discharge of plastic pollution in the Ganga River. *Sustainability*, 17.
- Sharma K, Nayarisseri A, Singh S K (2024) Biodegradation of plasticizers by novel strains of bacteria isolated from plastic waste near Juhu Beach, Mumbai, India. *Scientific Reports*, 14.
- Sieck E, Bruening M, van Woerden I, Whisner C, Payne-Sturges C (2024) Effects of behavioral, clinical, and policy interventions in reducing human exposure to bisphenols and phthalates: A scoping review. *Environmental Health Perspectives*, 132.
- Štefunková N, Greifová H, Jambor T, Tokárová K, Zuščíková L, Bažány D, Massányi P, Capcarová M, Lukáč N (2024) Comparison of the effect of BPA and related bisphenols on membrane integrity, mitochondrial activity, and steroidogenesis of H295R cells in vitro. 14.
- Tian K, Gu J, Wang Y, Li H, Zhang L, Chen X (2024) Removal of BPA by *P. Asiatica* P1. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 288.
- Torres-García J L, Ahuatzin-Pérez M, Fernández F, Cortés-Espinosa D (2022) Bisphenol A in the environment and recent advances in biodegradation by fungi. *Chemosphere*, 303.
- Ucheana I, Ihedioha J, Njoku J, Okoye C, Oguejiokfor C (2024) Migration of bisphenol A from epoxy-can malt drink. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 104.
- Uddin N, Desai F, Asmatulu E (2021) Review of bioaccumulation, biomagnification, and biotransformation of engineered nanomaterials. *Nanotoxicology and Nanoeotoxicology*, 67.
- Wang J, Xie Y, Hou J, Li X, Zhang Y, Chen H (2022) Biodegradation of bisphenol A by alginate immobilized *P. chrysosporium* beads. *Biochemical Engineering Journal*, 177.
- Zeng-Jin W, Zhong-Yu W, Ying-Feng Z (2022) Adverse cardiovascular effects and potential molecular mechanisms of DEHP and its metabolites: A review. *Science of the Total Environment*, 847.