

Biodegradar para No Contaminar: El Futuro de los Plásticos

Zeltzin Danae Ruvalcaba-Aroche *, Isabel de la Luz Membrillo-Venegas, Gastón Martínez-de Jesús y Hugo Beatriz-Cuellar

Tecnológico Nacional de México: Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec. Ecatepec, Estado de México, México.

* Autor de correspondencia: 202422230@tese.edu.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 6 de junio de 2025 Aceptado: 19 de julio de 2025 Publicado: 9 de agosto de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.478>

Resumen: Hoy en día, la producción y acumulación de plásticos a nivel mundial constituye un problema ambiental de gran relevancia, con impactos negativos tanto en la salud humana como en los ecosistemas marinos. Además, la eliminación de los plásticos genera químicos tóxicos y microplásticos, entre otros efectos negativos. Por ello, este artículo de divulgación científica describe los principales tipos, características y aplicaciones de los plásticos más utilizados en la actualidad, los métodos tradicionales para su eliminación, y los aspectos más relevantes de la biodegradación de plásticos. En este contexto, un proceso de biodegradación de plásticos es un método prometedor mediante el cual hongos, bacterias o microalgas descomponen el plástico, transformándolo en sustancias más simples y menos perjudiciales para el medio ambiente. Finalmente, investigar nuevas metodologías para la degradación o eliminación de plásticos, que generen la menor cantidad posible de productos nocivos y contribuyan a reducir los niveles de contaminación, es fundamental para avanzar hacia una industria más sustentable y respetuosa con el medio ambiente.

Palabras clave: biodegradación; plástico; microorganismos; contaminación; medio ambiente

Introducción

Actualmente, se producen a nivel mundial más de 400 millones de toneladas de plástico cada año (Maitlo *et al.*, 2022). Esto se debe a las diferentes propiedades del plástico, tales como durabilidad, resistencia, aislamiento eléctrico, baja conductividad térmica, peso ligero y bajo costo, así como a su amplia gama de aplicaciones en sectores como la salud, la vivienda, la construcción, la vestimenta, el transporte y el embalaje. Sin embargo, la producción y el uso de plásticos generan una serie de impactos negativos para el medio ambiente, entre ellos la contaminación del aire, daños a diversas especies marinas, emisiones de gases de efecto invernadero, microplásticos, acumulación en suelos y océanos, y riesgos para la salud humana. Adicionalmente, los plásticos pueden permanecer en el medio ambiente durante cientos o incluso miles de años, ya que no están diseñados para degradarse ni reciclarse fácilmente (Horton, 2022). Otra problemática importante relacionada con los plásticos es la presencia o formación de microplásticos, que son partículas de plástico de menos de 5 milímetros (Wei *et al.*, 2024). Estos pueden generarse a partir de la degradación de objetos plásticos más grandes (por ejemplo, botellas, bolsas o prendas de ropa sintética) y tienen el potencial de causar efectos nocivos en la salud humana, en los animales y en el medio ambiente (Bahl *et al.*, 2021; Amobonye *et al.*, 2021; Temporiti *et al.*, 2022).

Por otro lado, la eliminación de plásticos se lleva a cabo mediante su disposición final en vertederos, la incineración para la recuperación energética (eléctrica o térmica), el reciclaje mecánico o térmico, la degradación química o térmica, entre otros métodos. No obstante, estas prácticas pueden generar la acumulación de metales pesados en los ecosistemas, implican altos costos operativos, no eliminan completamente los plásticos, y requieren grandes cantidades de energía (Goel *et al.*, 2021). Por esta razón, es fundamental investigar, proponer e innovar nuevas metodologías para la eliminación y/o degradación de plásticos que contribuyan a reducir los niveles de contaminación del planeta, y que, a su vez, no generen residuos tóxicos que causen problemas en el medio ambiente. Además, dichos métodos deben tener un impacto mínimo en el medio ambiente, es decir, no deben generar productos finales nocivos o tóxicos. En este contexto, este artículo de divulgación científica describe las características de la biodegradación de plásticos, un proceso que emplea bacterias, hongos o microalgas para descomponer estos materiales y que genera compuestos finales menos tóxicos que los métodos convencionales (vertederos, incineración, etc.) (Andler *et al.*, 2022; Choe *et al.*, 2021); (Srikanth *et al.*, 2022). También, la biodegradación ayuda a disminuir la contaminación ambiental, tiene un menor impacto en los ecosistemas y no requiere el uso de productos químicos tóxicos. Asimismo, se abordan los principales factores que intervienen e influyen en el proceso de biodegradación de plásticos. También se mencionan los tipos de plásticos más utilizados en las actividades humanas, sus propiedades más relevantes, las problemáticas que generan, y los métodos empleados para su eliminación, entre otros aspectos.

Desarrollo

Actualmente, existe una gran variedad de plásticos; sin embargo, los más utilizados son el polietileno de alta densidad, el polietileno de baja densidad, el tereftalato de polietileno y el cloruro de polivinilo. Esto se debe a su bajo costo de producción, versatilidad de propiedades, amplia disponibilidad de materias primas, entre otros factores (Millican & Agarwal, 2021; Shams *et al.*, 2021). La Tabla 1 presenta las principales características de estos plásticos. Por otro lado, únicamente el 9 % de la producción anual de plásticos se recicla, lo cual resulta ineficaz para contrarrestar el impacto ambiental de su producción. En este sentido, los plásticos mencionados anteriormente pueden reciclarse para su recuperación y reutilizarse en la fabricación de nuevos productos. Sin embargo, las opciones de reciclaje suelen ser complejas, costosas y, en algunos casos, pueden generar contaminación. Además, cada tipo de plástico posee propiedades distintas, por lo que es necesario analizar sus características para determinar el enfoque adecuado para su reciclado (Singh & Walker, 2024; Shen & Worrell, 2024). También es importante considerar los problemas ambientales asociados al reciclaje, ya que el reciclado repetido de los plásticos puede alterar sus propiedades mecánicas, lo que limita o incluso impide su reutilización en ciertos casos (Zeenat *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2023; Kotova *et al.*, 2021).

Tabla 1. Características principales de los plásticos más utilizados en la actualidad.

Plástico	Propiedades	Aplicación	Contaminación
Polietileno de alta densidad	Resistencia química	Botellas	Desechos domiciliarios
	Resistencia térmica	Bolsas resistentes	Contaminación de suelos y aguas
	Resistencia al impacto	Tuberías	Daño a la fauna
	Ligero	Productos para el hogar	Liberación de sustancias tóxicas
Polietileno de baja densidad	Resistente al agua	Bolsas y empaques flexibles	Contaminación visual
	Resistencia química	Envases y contenedores	Microplásticos
	Flexibilidad y ligereza	Películas adhesivas	Daños a la fauna
	Resistencia a impactos		Contaminación por incineración
Cloruro de polivinilo	Resistencia química	Empaque y embalaje	Emisiones de compuestos tóxicos
	Durabilidad	Tuberías y conexiones	Liberación de gases tóxicos
	Aislante eléctrico	Aislamiento de cables	Acumulación en vertederos
	Económico	Elementos de automóviles	Microplásticos
Tereftalato de polietileno	Resistencia mecánica	Botellas de agua	Microplásticos
	Ligero	Envases de alimentos	Daño a la fauna
	Resistencia química	Ropa	Acumulación masiva
	Flexible		Liberación de químicos tóxicos

Otros métodos para la eliminación de plásticos son la incineración y colocación en vertederos (Nayanathara Thathsarani Pilapitiya & Ratnayake, 2024; Pathak *et al.*, 2023). En este contexto, la colocación de plásticos en vertederos requiere mucho espacio, genera contaminación ambiental debido a que los plásticos tardan cientos o incluso miles de años en degradarse, puede afectar a la flora y la fauna, y liberar gases tóxicos. Mientras que la incineración o quema de plásticos se puede utilizar para obtener energía térmica o eléctrica para su uso en diferentes aplicaciones; no obstante, se produce la liberación de gases tóxicos, se requiere infraestructura especializada para controlar la temperatura, tratar los gases y manejar la ceniza. Además, la incineración de plásticos tiene un elevado costo, especialmente por la instalación y los sistemas de control ambiental necesarios. En consecuencia, los métodos tradicionales como los vertederos, la incineración y el reciclaje han sido útiles para manejar grandes cantidades de residuos plásticos, pero no son soluciones perfectas debido a las diferentes consecuencias que conlleva su utilización (Manzoor *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2023).

Otro problema asociado al uso y la eliminación de plásticos es la generación de microplásticos, los cuales se originan por la fragmentación de plásticos de mayor tamaño. Estos pueden provocar diversos efectos negativos, como alteraciones hormonales y daños al sistema inmunológico en los seres humanos; deterioro de suelos y cultivos,

incluyendo la pérdida de fertilidad y cambios en la estructura del suelo; así como impactos severos en la vida marina, como bloqueos intestinales, desnutrición e incluso la muerte de organismos (Stoett *et al.*, 2024; Cássio *et al.*, 2022; Maquart *et al.*, 2022).

Degradación de plásticos

Actualmente, es fundamental buscar y desarrollar opciones más sostenibles y amigables con el medio ambiente para reducir o eliminar el uso de plásticos. En este sentido, la degradación abiótica y la degradación biótica son procesos mediante los cuales los plásticos se descomponen en componentes más simples, a través de cambios en sus propiedades físicas y químicas. Estos procesos pueden considerarse métodos naturales: la degradación abiótica ocurre por acción de factores como la luz, la temperatura, el aire, el agua y las fuerzas mecánicas, mientras que la degradación biótica se lleva a cabo mediante la acción de microorganismos como bacterias, hongos o algas. La Figura 1 muestra un diagrama esquemático que describe los procesos comúnmente usados para la degradación de plásticos. La degradación abiótica produce cambios en la composición química, la textura, y las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de los plásticos. Dentro de este tipo de degradación, se pueden emplear distintos procesos, como la degradación térmica, que implica la descomposición de los plásticos debido a su exposición a temperaturas elevadas; la degradación química, que ocurre cuando los plásticos entran en contacto con contaminantes atmosféricos como el ozono, el dióxido de azufre, el dióxido de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles; y la degradación mecánica, que se produce por la acción de fuerzas externas, como la abrasión provocada por rocas y arena, el viento o el movimiento de las olas del mar. Los resultados de la degradación abiótica incluyen cambios en la apariencia y la textura de los plásticos; es decir, pueden observarse alteraciones en el color, el brillo, la amarillez, entre otros aspectos. Asimismo, las propiedades fisicoquímicas, como la cristalinidad, las propiedades térmicas y las propiedades superficiales, pueden modificarse durante el proceso de degradación. La caracterización del grado de degradación provocado por los distintos métodos abióticos puede realizarse mediante instrumentos como colorímetros, espectrofotómetros, brillómetros y medidores de opacidad (Tantawi *et al.*, 2025). Por otra parte, la degradación biótica de plásticos es el proceso por el cual organismos vivos descomponen o modifican los plásticos. Sin embargo, no siempre significa que el plástico desaparezca por completo. A veces solo se rompe en pedazos más pequeños o cambia su composición.

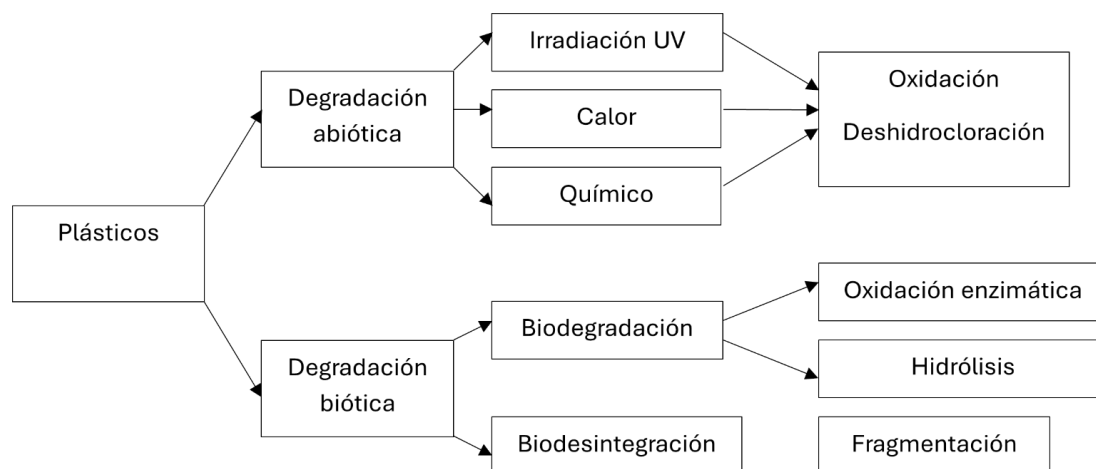


Figura 1. Procesos involucrados en la degradación de los plásticos.

Biodegradación de plásticos

La biodegradación es un proceso específico dentro de la degradación biótica que implica el uso de plásticos como sustrato para el crecimiento y desarrollo de microorganismos (hongos, bacterias o microalgas) y, en consecuencia, la descomposición de los plásticos en productos más simples para el medio ambiente, como CO₂, agua y biomasa (Puja Asiandu *et al.*, 2020; Lv *et al.*, 2024; Tania & Anand, 2025). La Figura 2 muestra una representación gráfica de la biodegradación de plásticos por la acción de microorganismos.

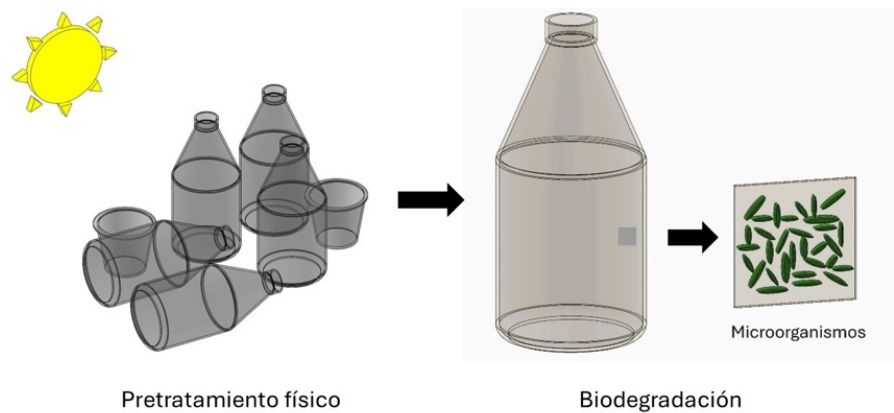


Figura 2. Representación gráfica de la biodegradación de plásticos.

Dentro de la biodegradación, los hongos son los microorganismos más utilizados para este proceso debido a sus propiedades. Por ejemplo, secretan enzimas que degradan materiales complejos, pueden adaptarse a diversos ambientes (como baja humedad o escasa disponibilidad de nutrientes), son capaces de penetrar materiales sólidos gracias a su micelio y producen compuestos finales menos tóxicos en comparación con los métodos tradicionales para la degradación de plásticos. Las enzimas más utilizadas para la degradación de plástico son cutinasas, lipasas, proteasas, lacasas, y peroxidasas (Cai *et al.*, 2023). Por otro lado, algunos plásticos son muy complejos para degradar únicamente por la acción de microorganismos. Por esta razón, se realizan pretratamientos físicos a los plásticos para mejorar el proceso de biodegradación. Algunos ejemplos de pretratamientos físicos son la radiación ultravioleta, la termo-oxidación, la trituración, entre otros (Ciuffi *et al.*, 2024). El objetivo principal de un pretratamiento físico es causar degradación, cambios de color, agrietamiento y reducción de las propiedades mecánicas de los plásticos. Esto facilita la adhesión y colonización de los microorganismos en la superficie de los plásticos, entre otros efectos beneficiosos. La Tabla 2 muestra las características de la biodegradación de plásticos mencionados en la Tabla 1 (Ekanayaka *et al.*, 2022; Evode *et al.*, 2021). Adicionalmente, medir la eficiencia de la biodegradación de plásticos mediante microorganismos implica evaluar qué tan bien y qué tan rápido estos pueden descomponer el plástico. Para ello, se pueden considerar distintos métodos, como medir el peso del plástico antes y después de la degradación, realizar análisis microscópicos de su superficie, cuantificar la cantidad de dióxido de carbono liberado, evaluar el crecimiento microbiano y analizar las propiedades fisicoquímicas del plástico, entre otros (Zhang *et al.*, 2021; Ali *et al.*, 2021; Matjašič *et al.*, 2021; Crystal Thew *et al.*, 2024; Mat Yasin *et al.*, 2022).

Tabla 2. Microorganismos utilizados para la degradación de plástico.

Tipo de plástico	Microorganismo	Enzimas	Pretratamiento
Poliétileno de alta densidad	<i>Aspergillus niger</i>	Lacasas	Irradiación UV
	<i>Penicillium simplicissimum</i>	Peroxidasas	Termo oxidación
	<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	Lipasas	Radiación ionizante
Poliétileno de baja densidad	<i>Aspergillus niger</i>	Lacasa	Irradiación UV
	<i>Penicillium simplicissimum</i>	Manganeso peroxidasa	Termo oxidación
	<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	Lignina peroxidasa	Radiación ionizante
Cloruro de polivinilo	<i>Fusarium solani</i>	Cutinasas	
	<i>Aspergillus niger</i>	Lacasas	Irradiación UV
	<i>Aspergillus flavus</i>	Lignina peroxidasa	Termo oxidación
Tereftalato de polietileno	<i>Cochliobolus sp.</i>	Manganeso peroxidasa	Radiación ionizante
	<i>Streptomyces scabies</i>	Cutinasas	
	<i>Streptomyces sp.</i>	Lipasas	Irradiación UV
	<i>Fusarium oxysporum</i>	Poliesterasas	Radiación ionizante
	<i>Aspergillus oryzae</i>		
	<i>Penicillium citrinum</i>		

Conclusiones

Los residuos plásticos constituyen un problema ambiental cada vez más urgente, lo que ha provocado que los investigadores se centren en el uso de microorganismos para su biodegradación. En este contexto, el uso de diferentes microorganismos como herramientas de biorremediación se estudia cada vez más. Por esto, este artículo de divulgación científica describe los aspectos más relevantes de la biodegradación de plásticos, tales como las propiedades de diferentes tipos de plásticos, los tipos de microorganismos más utilizados para la degradación y los principales factores que intervienen en este proceso. Además, se describen las diferentes problemáticas debidas al proceso de reciclado y al uso de los métodos tradicionales para la degradación de plásticos. En este sentido, la biodegradación es un proceso que contribuye a la reducción de la contaminación ambiental, produce una menor emisión de gases tóxicos, y reduce el impacto sobre la fauna provocado por la acumulación de microplásticos en el mar. Actualmente, la biodegradación de plásticos se lleva a cabo principalmente en instalaciones controladas, donde se estudian diferentes tipos de microorganismos, así como la eficiencia del proceso. No obstante, se busca extender su aplicación a ambientes naturales como lagos, suelos, océanos, ríos y vertederos, donde la acción microbiana pueda acelerar la descomposición de los plásticos y contribuir a mejorar la calidad de vida de las personas y los animales afectados por esta problemática. Como sociedad, debemos apoyar este tipo de soluciones innovadoras y al mismo tiempo reducir nuestro consumo de plásticos, entendiendo que la tecnología sola no basta; el compromiso individual y colectivo es fundamental para proteger nuestro planeta.

Agradecimientos y financiamiento: Zeltzin Danae Ruvalcaba Aroche (CVU: 1059308, No. Apoyo: 4049885) y Hugo Beatriz Cuellar (CVU: 1007017) agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada.

Bibliografía

- Ali, S. S., Elsamahy, T., Al-Tohamy, R., Zhu, D., Mahmoud, Y. A.-G., Koutra, E., Metwally, M. A., Kornaros, M., & Sun, J. (2021). Plastic wastes biodegradation: Mechanisms, challenges and future prospects. *Science of The Total Environment*, 780, 146590. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146590>
- Amobonye, A., Bhagwat, P., Singh, S., & Pillai, S. (2021). Plastic biodegradation: Frontline microbes and their enzymes. *Science of The Total Environment*, 759, 143536. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143536>
- Andler, R., Tiso, T., Blank, L., Andreeßen, C., Zampolli, J., D'Afonseca, V., Guajardo, C., & Díaz-Barrera, A. (2022). Current progress on the biodegradation of synthetic plastics: from fundamentals to biotechnological applications. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 21(4), 829–850. <https://doi.org/10.1007/s11157-022-09631-2>
- Bahl, S., Dolma, J., Jyot Singh, J., & Sehgal, S. (2021). Biodegradation of plastics: A state of the art review. *Materials Today: Proceedings*, 39, 31–34. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.096>
- Cai, Z., Li, M., Zhu, Z., Wang, X., Huang, Y., Li, T., Gong, H., & Yan, M. (2023). Biological Degradation of Plastics and Microplastics: A Recent Perspective on Associated Mechanisms and Influencing Factors. *Microorganisms*, 11(7), 1661. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11071661>
- Cássio, F., Batista, D., & Pradhan, A. (2022). Plastic Interactions with Pollutants and Consequences to Aquatic Ecosystems: What We Know and What We Do Not Know. *Biomolecules*, 12(6), 798. <https://doi.org/10.3390/biom12060798>
- Choe, S., Kim, Y., Won, Y., & Myung, J. (2021). Bridging Three Gaps in Biodegradable Plastics: Misconceptions and Truths About Biodegradation. *Frontiers in Chemistry*, 9, 671750. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.671750>
- Ciuffi, B., Frattini, E., & Rosi, L. (2024). Plastic pretreatment: The key for efficient enzymatic and biodegradation processes. *Polymer Degradation and Stability*, 222, 110698. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2024.110698>
- Crystal Thew, X. E., Lo, S. C., Ramanan, R. N., Tey, B. T., Huy, N. D., & Chien Wei, O. (2024). Enhancing plastic biodegradation process: strategies and opportunities. *Critical Reviews in Biotechnology*, 44(3), 477–494. <https://doi.org/10.1080/07388551.2023.2170861>
- Ekanayaka, A. H., Tibpromma, S., Dai, D., Xu, R., Suwannarach, N., Stephenson, S. L., Dao, C., & Karunaratna, S. C. (2022). A Review of the Fungi That Degrade Plastic. *Journal of Fungi*, 8(8), 772. <https://doi.org/10.3390/jof8080772>
- Evode, N., Qamar, S. A., Bilal, M., Barceló, D., & Iqbal, H. M. N. (2021). Plastic waste and its management strategies for environmental sustainability. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4, 100142. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2021.100142>
- Goel, V., Luthra, P., Kapur, G. S., & Ramakumar, S. S. V. (2021). Biodegradable/Bio-plastics: Myths and Realities. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(10), 3079–3104. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02099-1>
- Horton, A. A. (2022). Plastic pollution: When do we know enough? *Journal of Hazardous Materials*, 422, 126885. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126885>
- Kim, M. S., Chang, H., Zheng, L., Yan, Q., Pflieger, B. F., Klier, J., Nelson, K., Majumder, E. L.-W., & Huber, G. W. (2023). A Review of Biodegradable Plastics: Chemistry, Applications, Properties, and Future Research Needs. *Chemical Reviews*, 123(16), 9915–9939. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00876>
- Kotova, I. B., Taktarova, Yu. V., Tsavkelova, E. A., Egorova, M. A., Bubnov, I. A., Malakhova, D. V., Shirinkina, L. I., Sokolova, T. G., & Bonch-Osmolovskaya, E. A. (2021). Microbial Degradation of Plastics and Approaches to Make it More Efficient. *Microbiology*, 90(6), 671–701. <https://doi.org/10.1134/S0026261721060084>
- Lv, S., Li, Y., Zhao, S., & Shao, Z. (2024). Biodegradation of Typical Plastics: From Microbial Diversity to Metabolic Mechanisms. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(1), 593. <https://doi.org/10.3390/ijms25010593>

- Maitlo, G., Ali, I., Maitlo, H. A., Ali, S., Unar, I. N., Ahmad, M. B., Bhutto, D. K., Karmani, R. K., Naich, S. ur R., Sajjad, R. U., Ali, S., & Afridi, M. N. (2022). Plastic Waste Recycling, Applications, and Future Prospects for a Sustainable Environment. *Sustainability*, 14(18), 11637. <https://doi.org/10.3390/su141811637>
- Manzoor, S., Naqash, N., Rashid, G., & Singh, R. (2022). Plastic Material Degradation and Formation of Microplastic in the Environment: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 56, 3254–3260. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.379>
- Maquart, P. O., Froehlich, Y., & Boyer, S. (2022). Plastic pollution and infectious diseases. *The Lancet Planetary Health*, 6(10), e842–e845. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(22\)00198-X/ASSET/DF5BEA3E-C947-426C-BC3C-8B15670B2C72/MAIN.ASSETS/GR1.JPG](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00198-X/ASSET/DF5BEA3E-C947-426C-BC3C-8B15670B2C72/MAIN.ASSETS/GR1.JPG)
- Mat Yasin, N., Akkermans, S., & Van Impe, J. F. M. (2022). Enhancing the biodegradation of (bio)plastic through pretreatments: A critical review. *Waste Management*, 150, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.06.004>
- Matjašič, T., Simčič, T., Medvešček, N., Bajt, O., Dreo, T., & Mori, N. (2021). Critical evaluation of biodegradation studies on synthetic plastics through a systematic literature review. *Science of The Total Environment*, 752, 141959. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141959>
- Millican, J. M., & Agarwal, S. (2021). Plastic Pollution: A Material Problem? *Macromolecules*, 54(10), 4455–4469. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.0c02814>
- Nayanathara Thatthasrani Pilapitiya, P. G. C., & Ratnayake, A. S. (2024). The world of plastic waste: A review. *Cleaner Materials*, 11, 100220. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100220>
- Pathak, G., Nichter, M., Hardon, A., Moyer, E., Latkar, A., Simbaya, J., Pakasi, D., Taqueban, E., & Love, J. (2023). Plastic pollution and the open burning of plastic wastes. *Global Environmental Change*, 80, 102648. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102648>
- Puja Asiandu, A., Wahyudi, A., & Sari, S. W. (2020). A Review: Plastics Waste Biodegradation Using Plastics-Degrading Bacteria. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 9(1), 148–157. [https://doi.org/10.47277/JETT/9\(1\)157](https://doi.org/10.47277/JETT/9(1)157)
- Shams, M., Alam, I., & Mahbub, M. S. (2021). Plastic pollution during COVID-19: Plastic waste directives and its long-term impact on the environment. *Environmental Advances*, 5, 100119. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100119>
- Shen, L., & Worrell, E. (2024). Plastic recycling. In *Handbook of Recycling* (pp. 497–510). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85514-3.00014-2>
- Silva, R. R. A., Marques, C. S., Arruda, T. R., Teixeira, S. C., & de Oliveira, T. V. (2023). Biodegradation of Polymers: Stages, Measurement, Standards and Prospects. *Macromol*, 3(2), 371–399. <https://doi.org/10.3390/macromol3020023>
- Singh, N., & Walker, T. R. (2024). Plastic recycling: A panacea or environmental pollution problem. *Npj Materials Sustainability*, 2(1), 17. <https://doi.org/10.1038/s44296-024-00024-w>
- Srikanth, M., Sandeep, T. S. R. S., Sucharitha, K., & Godi, S. (2022). Biodegradation of plastic polymers by fungi: a brief review. *Bioresources and Bioprocessing*, 9(1), 42. <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00532-4>
- Stoett, P., Scrich, V. M., Elliff, C. I., Andrade, M. M., de M. Grilli, N., & Turra, A. (2024). Global plastic pollution, sustainable development, and plastic justice. *World Development*, 184, 106756. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2024.106756>
- Tania, M., & Anand, V. (2025). The implementation of microbes in plastic biodegradation. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, 11(2), 208–218. <https://doi.org/10.1007/s43994-023-00077-y>
- Tantawi, O., Joo, W., Martin, E. E., Av-Ron, S. H. M., Bannister, K. R., Prather, K. L. J., Olsen, B. D., & Plata, D. L. (2025). Designing for degradation: the importance of considering biotic and abiotic polymer degradation. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 27(5), 1303–1316. <https://doi.org/10.1039/D5EM00079C>
- Temporiti, M. E. E., Nicola, L., Nielsen, E., & Tosi, S. (2022). Fungal Enzymes Involved in Plastics Biodegradation. *Microorganisms* 2022, 10(6), 1180. <https://doi.org/10.3390/MICROORGANISMS10061180>
- Wei, X.-F., Yang, W., & Hedenqvist, M. S. (2024). Plastic pollution amplified by a warming climate. *Nature Communications*, 15(1), 2052. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46127-9>
- Zeenat, Elahi, A., Bukhari, D. A., Shamim, S., & Rehman, A. (2021). Plastics degradation by microbes: A sustainable approach. *Journal of King Saud University - Science*, 33(6), 101538. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101538>
- Zhang, K., Hamidian, A. H., Tubić, A., Zhang, Y., Fang, J. K. H., Wu, C., & Lam, P. K. S. (2021). Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review. *Environmental Pollution*, 274, 116554. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116554>