

PHB ¿Plasti-Villano o Nuevo Héroe?

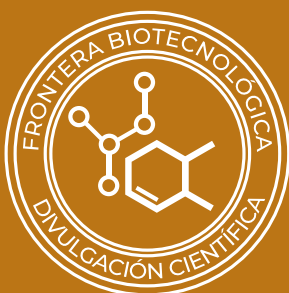
Melendez Xicohtencatl Yazmin¹; Diaz Pacheco Adrián²; Romero Sánchez Marco Tulio¹; Hernández Rodríguez Aranza¹; Gracida Rodríguez Jorge Noel³; Sierra Martínez Pável⁴; López y López Víctor Eric^{1*}

¹Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada, Carretera Estatal Santa Inés Tecuexcomac-Tepetitla, km 1.5, Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala C.P. 90700, México. *Correspondencia: vlopezyl@ipn.mx

²Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Tlaxcala del Instituto Politécnico Nacional, Guillermo Valle, Tlaxcala, C.P. 90000, México.

³Univesidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas, Querétaro, C.P. 76010, México.

⁴Universidad Autónoma de Guerrero, Lázaro Cárdenas, Guerrero, C.P. 39086, México.





RESUMEN

La cantidad de residuos plásticos sigue aumentando, debido a esta contaminación, una de las principales inquietudes es que también se ha incrementado la cantidad de los microplásticos en la alimentación humana. Por ello, se han buscado alternativas que permitan sustituir a los plásticos, que no contribuyan como desechos persistentes, al contrario, que los materiales desarrollados sean amigables con el ambiente, dando como opciones los bioplásticos. Entre los tipos de bioplásticos se encuentra los polihidroxialcanoatos (PHAs), estos conforman una familia de biopolímeros, entre los que resalta el polihidroxibutirato (PHB). El PHB se ha posicionado como el de mayor interés debido a sus similitudes con los plásticos, ser biodegradable y tener diferentes aplicaciones. En esta revisión se abordará la problemática actual por contaminación enfocada en los microplásticos, el rol del PHB, y como puede llegar a ser una alternativa contra la contaminación.

Palabras clave: Contaminación, microplásticos, bioplásticos, ecosostenible

ABSTRACT

The amount of plastic waste is constantly increasing, due to this contamination, one of the main concerns is that the amount of microplastics in human food has also increased. Therefore, alternatives have been sought to replace plastics, which do not contribute as persistent waste, on the contrary, the materials developed are environmentally friendly, presenting bioplastics as alternatives. Among the types of bioplastics are polyhydroxyalkanoates (PHAs), which is a family of biopolymers, among which polyhydroxybutyrate (PHB) stands out. PHB has positioned itself as the one of greatest interest due to its similarities with plastics, its biodegradability and its different applications. This review will address the current pollution problem focused on microplastics, the role of PHB, and how it can become an alternative against pollution.

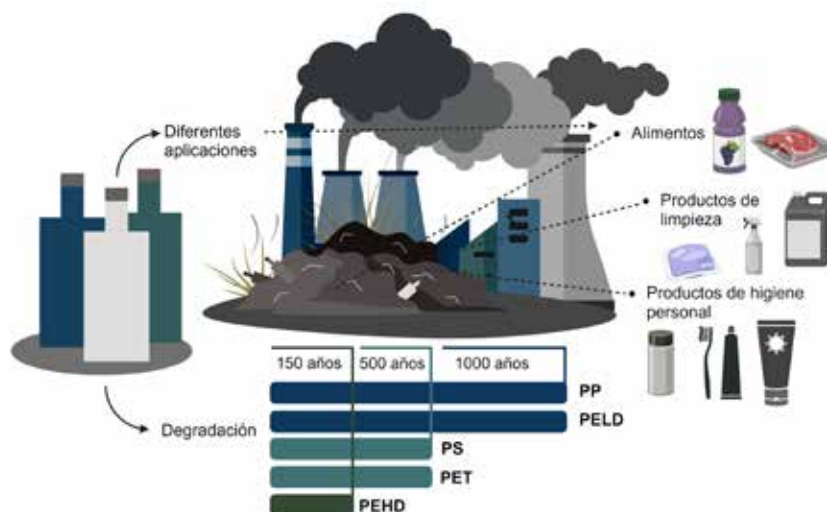
Keywords: Pollution, microplastics, bioplastics, pollution, eco-sustainable

Introducción: plásticos sintéticos, los villanos ambientales más empleados

A lo largo de los años el uso de plásticos se ha popularizado debido a las ventajas que presenta en comparación con materiales como metales o vidrio. Sus propiedades como buena maleabilidad, alta resistencia y bajo costo de producción lo han colocado como una de las materias primas y productos más comercializados. A su vez sus características químicas, eléctricas, térmicas y su amplio campo de aplicaciones permiten colocarlo en el mercado mundial por encima de otros materiales [Elhacham et al. 2020]. Sin embargo, el uso indiscriminado de los plásticos en la mayoría de las actividades huma-

nas tanto domésticas como industriales ha generado un desmesurado problema de contaminación. Esto en gran parte por sus largos tiempos de degradación, ya que tan solo para una botella de agua purificada, el promedio de degradación es entre 70 a 450 años, o por ejemplo las bolsas que se usan en el supermercado es de 500 a 1000 años (Figura 1). Aun cuando sufren un deterioro, no logran degradarse del todo, sino que se forman microplásticos, los mismos que pueden permanecer por cientos de años y generar repercusiones tanto ambientales como de salud [Chamas et al. 2020; Priya et al. 2022]

Figura 1. Diferentes aplicaciones de los plásticos, donde su tiempo de degradación varía dependiendo del material de acuerdo con datos de Webb et al. 2013



Aunque existen una amplia variedad de plásticos, se consideran los usados frecuentemente a los tipos de plásticos como el polipropileno (PP), polietileno de alta densidad (PEHD), polietileno de baja densidad (PELD), cloruro de polivinilo (PVC), poliestireno (PS), poliéster tereftalato de polietileno (PET), poliamida y acrílico, son considerados los tipos más comunes de plásticos contaminantes. En la Tabla 1 se resumen ejemplos de los usos de los plásticos.

Tabla 1. Polímeros más empleados y su uso común.

Plástico	Parámetros fisicoquímicos
PP	Empaques, partes de motores, partes en textiles.
PEHD	Dispositivos médicos, chalecos antibalas.
PELD	Bolsas de plástico, envolturas de plástico.
PVC	Tuberías, recubrimiento de cables, pisos.
PS	Embalaje, aislamiento, placas Petri.
Poliéster	Ropa, aislamiento, embalaje, cintas de grabación.
PET	Botellas, empaques de alimentos.
Poliamida	Productos de látex, nylon, gomas.
Acrílico	Productos de resinas usadas en cocina, construcción y motores.

Actualmente la producción de plásticos es aproximadamente de 450 millones de toneladas anuales, y se estima que la cantidad se duplique para 2045 [Bergmann et al. 2022]. En el año 2020, debido a la emergencia sanitaria global por COVID-19, el uso de plásticos de un solo uso aumento rápidamente, lo que generó alerta, por las mismas fechas el petróleo tuvo una caída en su precio, dando lugar a una producción en masas a bajo costo [Parashar y Hait, 2021; Trakunjae et al. 2023], aumentando así el problema de contaminación a nivel mundial.

2

La punta del iceberg: contaminación ambiental en suelos y mares

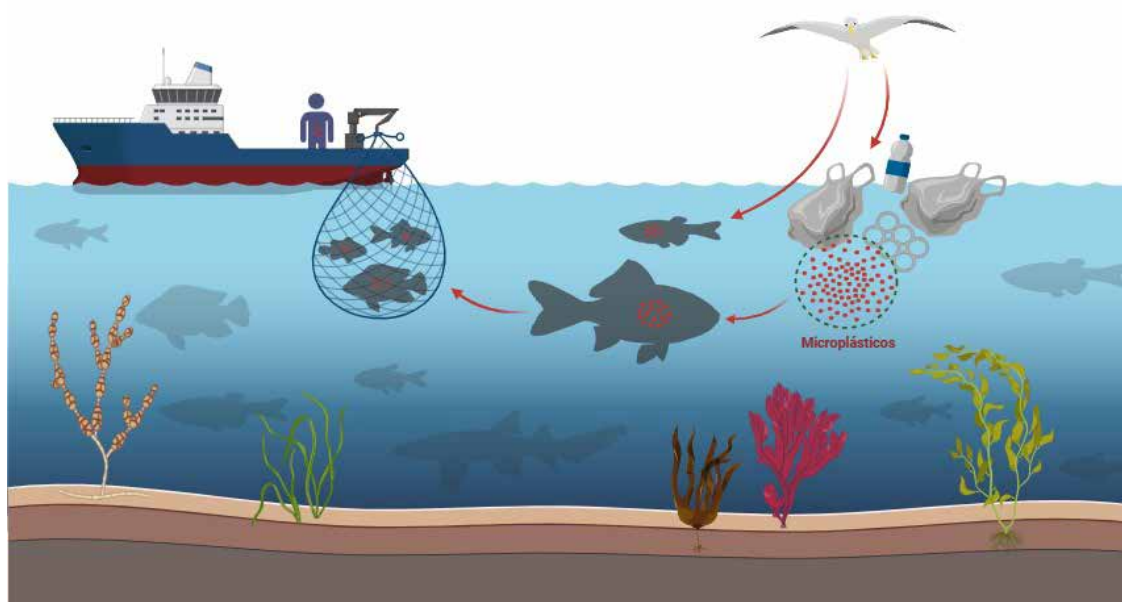
La gestión de los plásticos sintéticos no ha logrado ser la correcta, alrededor de solo un 7% llevan un proceso de reciclaje, un 8% son incinerados, mientras que un 85% terminan en vertederos o desechados ilegalmente [Vicente et al. 2023]. Aquellos residuos que representan un 85%, tienden a ser arrojados a mares, ríos, zonas verdes, entre otras. En el mar tan solo entre el 40-80 % de la contaminación encontrada en la superficie son desechos plásticos [Ronkay et al. 2021]. Muchas de las especies marinas se ven expuestas a riesgos por consumir microplásticos, y en su mayoría provocan estrangulamiento de la fauna marina [Aytan et al. 2023]. El ecosistema marino no ha sido el único afectado por la contaminación de plásticos. Los suelos, como cuerpos de agua también han sido perjudicados, por residuos plásticos que se estiman pueden estar durante cientos o miles de años [Melchor-Martínez et al. 2022]. Aunque el mayor problema de los ecosistemas terrestres y acuáticos es la contaminación por mega (>500 mm), macro (50-500 mm), meso (5-50 mm), micro (<5 mm) y nano (<0.001 mm) plásticos [Nguyen et al., 2023].

3

Consumo de microplásticos, la consecuencia de nuestra negligencia

La exposición al sol, el viento y el agua, así como incluso el desgaste de productos como las fibras textiles, ha generado microplásticos. Dejando expuesta a la fauna silvestre y marina al consumo de estos [Figura 2]. Al consumir los microplásticos es probable la ingesta de portadores aditivos como bisfenol-A [BPA], ftalato de bis[2-etilhexilo] [DEHP] y ftalato de dibutilo [DBP]. Para los seres vivos tanto el BPA y DEHP son consideradas sustancias químicas disruptoras endocrinas [EDC]. Las EDC pueden ocasionar a nivel epigenético en mujeres embarazadas, que el feto desarrolle enfermedades metabólicas, reproductivas y degenerativas que estarán presente a lo largo de su vida [Montero et al. 2023]. Los varones pueden verse afectados en el desarrollo testicular desde la etapa fetal, con esta exposición durante el embarazo se pueden desarrollar posteriormente anomalías urogenitales e inclusive cáncer testicular en hombres adultos [Rodprasert et al. 2021].

Figura 2. Ingesta de micro plásticos por organismos marinos y su propagación en la cadena trófica.



Desafortunadamente, no solo a través de alimentos de origen animal se obtienen los microplásticos. En 2019 Cox et al., determinaron el consumo anual promedio de microplásticos a través de alimentos como azúcar, miel, sal, alcohol, agua embotellada y de grifo, inclusive a través del aire. Se estima que el consumo anual en niños oscila entre 74,060 a 81,331 micro plásticos, mientras que en adultos es de aproximadamente 121,664 microplásticos aproximadamente. Se estima que una sola persona puede ingerir alrededor de 4 millones de plásticos finos [nano y microplásticos] anualmente a partir de agua potable [Angnunavuri et al. 2023].

4

Estrategias actuales para enfrentar la contaminación, ¿Son eficaces?

Ante la incorrecta y alarmante disposición final de los plásticos, generando a su vez cantidades prácticamente inconmensurables de nano y microplásticos, se ha buscado la implementación de legislaciones y cambios en las políticas para la contención, moderación y separación de plásticos. La acción más común ha sido el reciclaje, pero el resultado no ha sido favorable, ya que el ritmo de producción es mayor que su gestión en su disposición final [Walker y Fequet, 2023]. Por otro lado, los plásticos de uso común como el PET tienen una reciclabilidad limitada; en cuanto al PP, PEHD y PELD, el proceso de reciclaje resulta más costoso debido a su alto consumo energético [Wang et al. 2023].

Se tienen hoy en día tecnologías de limpieza, que buscan que espacios con desechos plásticos queden libre de los mismos. Desafortunadamente no es viable, puesto que los mismos espacios con el tiempo comienza a estar como en un inicio, por lo que para ser rentable es necesario tomar acciones preventivas, como el uso de materiales sostenibles y biodegradables que tengan potencial de reemplazar el plástico [Schmaltz et al. 2020] y, sobre todo, a los plásticos de un solo uso. Actualmente se busca la producción de bioplásticos, ya que presenta dichas características [Helinski et al. 2021].

5

Bioplásticos ¿La respuesta al problema de los residuos plásticos?

Los bioplásticos representan una alternativa al plástico convencional, en principio porque la mayoría son biodegradables y pueden ser producidos por síntesis microbiana a partir de materias primas renovables como almidón, caña de azúcar, soja, etc. Los tres bioplásticos más comunes son el ácido poliláctico (PLA), almidón termoplástico y los polihidroxialcanoatos (PHAs) (Tabla 2).

Biopolímero	Aplicación	Propiedades	Referencia
Polihidroxialcanoatos (PHAs)	En diferentes artículos como vasos, platos y cubiertos desechables, envases de empaque, componentes eléctricos.	Algunos PHAs son hidrosolubles, presentan biocompatibilidad por lo que tienen usos médicos, son biodegradables.	[Albuquerque y Malafaia, 2018]
Almidón	Se pueden encontrar como film translucido, envases de malla, bolsas, empaques.	Son hidrosolubles, presentan biodegradabilidad, y relativamente transparencia.	[Agarwal, 2021]
Ácido poliláctico (PLA)	Disponible en botellas, vasos, laminas, contenedores, ocupado en ingeniería de tejidos.	Son de origen renovable, tienen compatibilidad química y rigidez	[Mehmood et al. 2023]

Tabla 2. Características de bioplásticos biodegradables de base biológica

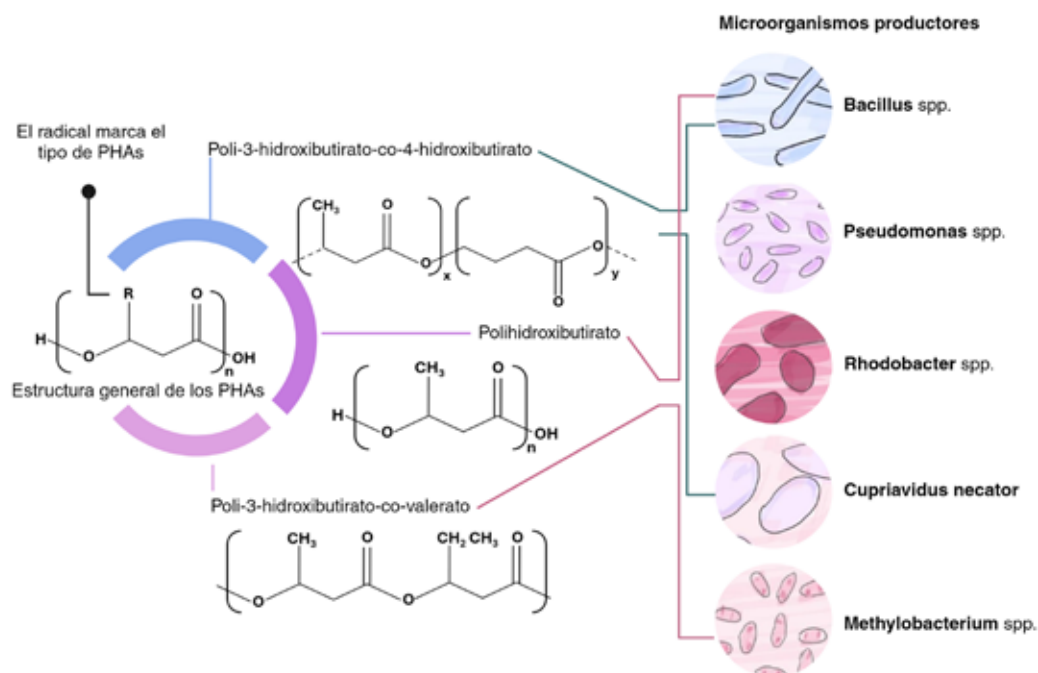
Normalmente se relaciona a los bioplásticos como alternativas amigables con el ambiente. Aunque no se conoce del todo la potencial huella ambiental que tienen, se esperarían mayores ventajas que desventajas. Si bien, se ha descrito por ejemplo que el plástico derivado de almidón tuvo un efecto negativo en el crecimiento para plantas de trigo, se deben de seguir planteando experimentos para demostrar sus ventajas a largo plazo. En cuanto a los PHAs, hasta el momento algunos estudios indican que su degradación no tiene influencia sobre la actividad de germinación del suelo [Arcos-Hernandez et al. 2012; Qi et al. 2018]. Por lo que se espera aumente su producción de acuerdo con informes de la asociación European Bioplastics, organismo enfocado a el avance y producción de los bioplásticos.

6

El futuro: El potencial del polihidroxibutirato

Entre los tipos de los PHAs más conocidos se encuentran el poli-3-hidroxibutirato (PHB), poli-3-hidroxibutirato-co-4-hidroxibutirato [P(3-HB-co-4-HB)], poli-3-hidroxibutirato-co-valerato (PHBV) [Fuessl et al. 2012]. Su síntesis es posible por varios microorganismos [Figura 3]. Lo principal para su producción, es una fuente de carbono en exceso, que puede provenir de aminoácidos, ácidos grasos o carbohidratos, con un déficit en microelementos como nitrógeno, fosforo, magnesio [Behera et al. 2022; Shah y Kumar, 2021]

Figura 3. Principales polihidroxicanoatos y microorganismos productores, el radical determina el tipo de PHAs.



Las características del PHB radican en su estructura química, en su síntesis se tiene reacción entre un grupo carbonilo e hidroxilo de dos unidades monoméricas, con un metilo como sustituyente. Tener el metilo, le proporciona características como la temperatura de fusión y un grado de cristalinidad muy parecida al polipropileno, usado normalmente para la fabricación de envases o empaques de alimentos [Raza et al. 2018; Umesh et al. 2021]. Otra de sus aplicaciones se encuentra en el campo médico, formando parte de materiales biocompatibles utilizados en medicina regenerativa, de tejidos o siendo material de soporte, inclusive como válvulas cardiacas [Kola Pratap y Krishnan, 2023]. Por otro lado, también ha sido aplicado en la agricultura, nanotecnología y alimentos [Mostafa et al. 2020]. No obstante, aún es alto el costo total de producción, por lo que es considerado un reto para la industrialización [B. Kim et al. 2023].



¿El PHB es un villano o realmente un héroe?

Para la producción de PHAs, el proceso global tiene tres etapas principales. La primera es con respecto a las materias primas, en específico la fuente de carbono que puede ser la más costosa. Su costo afecta al precio final del biopolímero, por lo que hoy en día se han implementado desechos agrícolas, aceites vegetales o inclusive glicerol como fuente de carbono para producirlo [Kanzariya et al. 2023]. La segunda etapa involucra la fermentación, la cual puede realizarse a través de lote, lote alimentado o continuo. Ambos tipos de fermentaciones buscan incrementar la productividad de PHB por medio de materias primas a bajo costo, como aquellas que provienen de desechos agrícolas. No obstante, con una incorrecta estrategia de fermentación se ven expuestas a la contaminación microbiana [Shahhosseini, 2004]. La aplicación de fermentaciones en lote o lote continuo bajo una estrategia de alimentación correcta puede llevar no solo al aumento de la productividad del PHB, sino que a su vez al aumento de la pureza del mismo [Dey y Rangarajan, 2017]

Las últimas etapas son la extracción y purificación, ambas operaciones depende del contenido de biomasa que se presente durante la fermentación. La obtención de resultados óptimos en la purificación está condicionada por la adecuada implementación de la técnica de extracción. En la extracción el uso de solventes es la parte principal, comúnmente son

halógenos como el cloroformo e hipoclorito de sodio, donde ambos tienen un alto potencial de daño ambiental. El PHB, siendo un producto ambientalmente amigable, enfrenta un desafío significativo debido a la alta contaminación generada en la etapa de extracción, la cual es una de las más complicadas en su proceso de producción. [Khatami et al. 2021; Sun et al. 2007]. El PHB presenta un cuello de botella en la parte de extracción donde en los últimos años se han buscado el empleo de los solventes conocidos como verdes tales como etanol, acetato de etilo o tetrahidrofurano, con ello se busca reducir el impacto ambiental [Jayarathna et al. 2022; Kurian y Das, 2021]. A pesar de ello actualmente en 2024 se cuenta con una producción global de 39.70 kilotoneladas, lo cual representa un valor de 144.35 millones de dólares [Mandaokar A, 2024]

Por otro lado, el problema central de los plásticos es su disposición final. El PHB ofrece la ventaja de ser degradado por despolimerasas de PHA, enzimas secretadas por diferentes microorganismos. A nivel laboratorio se ha visto que en un periodo de 10 días es posible degradar al 100%. A su vez en suelos con diferentes tratamientos se ha estudiado su descomposición, evaluándose el cambio en sus propiedades químicas, mecánicas e inclusive en su peso molecular, dando resultados favorables [Kim et al. 2023; Numata et al. 2008; Ren y Ni, 2023].



Conclusión

El impacto de los plásticos convencionales y su fragmentación a microplásticos representa un alto riesgo a la salud humana. Aunado el problema actual de contaminación ambiental y los efectos en el ecosistema. La búsqueda de encontrar un sustituto de los plásticos petroquímicos es inminente, por lo que el PHB presenta un panorama prometedor. Sin embargo, la producción a nivel industrial es reducida. Los métodos de producción actuales presentan bajos rendimientos y los procesos de extracción y purificación aun representan una problemática a resolver. A pesar de ello, se han ido presentando diferentes posibilidades para hacer el proceso más redituable y amigable con el ambiente, siendo uno de los enfoques principales en los últimos años. En definitiva, el PHB no es un villano, es un héroe en potencia que requiere adecuaciones en su camino a reemplazar los plásticos.

Agradecimientos

Esta investigación fue apoyada por el Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada (CIBA-IPN Unidad Tlaxcala), el Instituto Politécnico Nacional (Proyecto SIP20242318) y el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología [Becario CONAHCYT 1268180]

Agarwal S [2021]. Major factors affecting the characteristics of starch based biopolymer films. *European Polymer Journal*, 160, 110788. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110788>

Albuquerque PBS, Malafaia CB [2018]. Perspectives on the production, structural characteristics and potential applications of bioplastics derived from polyhydroxyalkanoates. *International Journal of Biological Macromolecules*, 107, 615–625. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.09.026>

Angunavuri PN, Attiogbe F, Mensah B [2023]. Particulate plastics in drinking water and potential human health effects: Current knowledge for management of freshwater plastic materials in Africa. *Environmental Pollution*, 316, 120714. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120714>

Arcos-Hernandez M V, Laycock B, Pratt S, Donose B C, Nikolić M A L, Luckman P, Werker A, Lant P A [2012]. Biodegradation in a soil environment of activated sludge derived polyhydroxyalkanoate (PHBV). *Polymer Degradation and Stability*, 97 [11], 2301–2312. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2012.07.035>

Aytan Ü, Başak Esensoy F, Şentürk Y, Güven O, Karaoğlu K, Erbay M [2023]. Plastic occurrence in fish caught in the highly industrialized Gulf of İzmit (Eastern Sea of Marmara, Türkiye). *Chemosphere*, 324, 138317. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138317>

Behera S, Priyadarshane M, Vandana Das S [2022]. Polyhydroxyalkanoates, the bioplastics of microbial origin: Properties, biochemical synthesis, and their applications. *Chemosphere*, 294, 133723. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133723>

Bergmann M, Almroth B C, Brander S M, Dey T, Green D S, Gundogdu S, Krieger A, Wagner M, Walker T R [2022]. A global plastic treaty must cap production. *Science*, 376 [6592], 469–470. <https://doi.org/10.1126/science.abq0082>

Chamas A, Moon H, Zheng J, Qiu Y, Tabassum T, Jang J H, Abu-Omar M, Scott S L, Suh S [2020]. Degradation Rates of Plastics in the Environment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(9), 3494–3511. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06635>

Cox KD, Covernton GA, Davies HL, Dower JF, Juanes F, Dudas SE [2019]. Human Consumption of Microplastics. *Environmental Science & Technology*, 53(12), 7068–7074. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01517>

Dey P, Rangarajan V [2017]. Improved fed-batch production of high-purity PHB [poly-3 hydroxy butyrate] by *Cupriavidus necator* [MTCC 1472] from sucrose-based cheap substrates under response surface-optimized conditions. *3 Biotech*, 7(5), 310. <https://doi.org/10.1007/s13205-017-0948-6>

Elhacham E, Ben-Uri L, Grozovski J, Bar-On YM, Milo R [2020]. Global human-made mass exceeds all living biomass. *Nature*, 588(7838), 442–444. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-3010-5>

Fuessl A, Yamamoto M, Schneller A [2012]. Opportunities in Bio-Based Building Blocks for Polycondensates and Vinyl Polymers. In *Polymer Science: A Comprehensive Reference* [pp. 49–70]. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53349-4.00132-1>

Helinski OK, Poor CJ, Wolfand JM [2021]. Ridding our rivers of plastic: A framework for plastic pollution capture device selection. *Marine Pollution Bulletin*, 165, 112095. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112095>

Jayarathna S, Andersson M, Andersson R [2022]. Recent Advances in Starch-Based Blends and Composites for Bioplastics Applications. *Polymers*, 14(21), 4557. <https://doi.org/10.3390/polym14214557>

Kanzariya R, Gautam A, Parikh S, Shah M, Gautam S [2023]. Formation of polyhydroxyalkanoates using agro and industrial waste as a substrate – a review. *Biotechnology and Genetic Engineering Reviews*, 1–40. <https://doi.org/10.1080/02648725.2023.2165222>

- Khatami K, Perez-Zabaleta M, Owusu-Agyeman I, Cetecioglu Z [2021]. Waste to bioplastics: How close are we to sustainable polyhydroxyalkanoates production? *Waste Management*, 119, 374–388. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.008>
- Kim B, Oh SJ, Hwang JH, Kim HJ, Shin N, Bhatia SK, Jeon JM, Yoon JJ, Yoo J, Ahn J, Park JH, Yang YH. [2023]. Polyhydroxybutyrate production from crude glycerol using a highly robust bacterial strain *Halomonas* sp. YLGW01. *International Journal of Biological Macromolecules*, 236, 123997. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123997>
- Kim J, Gupta NS, Bezek LB, Linn J, Bejagam KK, Banerjee S, Dumont JH, Nam SY, Kang HW, Park CH, Pilania G, Iverson CN, Marrone BL, Lee KS [2023]. Biodegradation Studies of Polyhydroxybutyrate and Polyhydroxybutyrate-co-Polyhydroxyvalerate Films in Soil. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(8), 7638. <https://doi.org/10.3390/ijms24087638>
- Kola Pratap J, Krishnan K [2023]. Microbial Production of Polyhydroxyalkanoates [Bioplastic] using Cheap Household Waste Resources and Their Biomedical Applications: A Systematic Review. *Letters in Applied NanoBioScience*, 12(4), 1–14.
- Kurian NS, Das B [2021]. Comparative analysis of various extraction processes based on economy, eco-friendly, purity and recovery of polyhydroxyalkanoate: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 183, 1881–1890. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.06.007>
- Mandaokar A [2024]. Polyhydroxyalkanoate Market Research Report Information by Type [Polyhydroxybutyrate and Polyhydroxyvalerate], by Application [Biomedical, Packaging, Drug Delivery Carriers, Biofuels and others], by Technology [Genetically Engineered Plants and Genetically Engineered Bacteria] [online]. Market research future. Available from: https://www.marketresearchfuture.com/reports/polyhydroxyalkanoate-market-4621?utm_term=&utm_campaign=&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=2893753364&hsa_cam=20269362920&hsa_grp=148912616334&hsa_ad=661977011274&hsa_src=g&hsa_tgt=dsa-2089395924464&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad_source=1
- Mehmood A, Raina N, Phakeenuya V, Wonganu B, Cheenkachorn, K [2023]. The current status and market trend of polylactic acid as biopolymer: Awareness and needs for sustainable development. *Materials Today: Proceedings*, 72, 3049–3055. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.387>
- Melchor-Martínez EM, Macías-Garbutt R, Alvarado-Ramírez L, Araújo RG, Sosa-Hernández JE, Ramírez-Gamboa D, Parra-Arroyo L, Alvarez AG, Monteverde RPB, Cazares KAS, Reyes-Mayer A, Yáñez Lino M, Iqbal HMN, Parra-Saldivar R [2022]. Towards a Circular Economy of Plastics: An Evaluation of the Systematic Transition to a New Generation of Bioplastics. *Polymers*, 14(6), 1203. <https://doi.org/10.3390/polym14061203>
- Montero V, Chinchilla Y, Gómez L, Flores A, Medaglia A, Guillén R, Montero E [2023]. Human health risk assessment for consumption of microplastics and plasticizing substances through marine species. *Environmental Research*, 237, 116843. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116843>
- Mostafa YS, Alrumman SA, Otaif KA, Alamri SA, Mostafa MS, Sahlabji T [2020]. Production and Characterization of Bioplastic by Polyhydroxybutyrate Accumulating *Erythrobacter aquimaris* Isolated from Mangrove Rhizosphere. *Molecules*, 25(1), 179. <https://doi.org/10.3390/molecules25010179>
- Nguyen LH, Nguyen BS, Le DT, Alomar TS, AlMasoud N, Ghotekar S, Oza R, Raizada P, Singh P, Nguyen VH [2023]. A concept for the biotechnological minimizing of emerging plastics, micro- and nano-plastics pollutants from the environment: A review. *Environmental Research*, 216, 114342. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114342>
- Numata K, Abe H, Doi Y [2008]. Enzymatic processes for biodegradation of poly(hydroxyalkanoate)s crystals. *Canadian Journal of Chemistry*, 86(6), 471–483. <https://doi.org/10.1139/v08-004>
- Parashar N, Hait S [2021]. Plastics in the time of COVID-19 pandemic: Protector or polluter? *Science of The Total Environment*, 759, 144274. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144274>
- Priya AK, Jalil AA, Dutta K, Rajendran S, Vasseghian Y, Qin J, Soto-Moscoso M [2022]. Microplastics in the environment: Recent developments in characteristic, occurrence, identification and ecological risk. *Chemosphere*, 298, 134161. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134161>
- Qi Y, Yang X, Pelaez AM, Huerta Lwanga E, Beriot N, Gertsen H, Garbeva P, Geissen V [2018]. Macro- and micro- plastics in soil-plant system: Effects of plastic mulch film residues on wheat (*Triticum aestivum*) growth. *Science of The Total Environment*, 645, 1048–1056. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.229>
- Raza ZA, Riaz S, Banat IM [2018]. Polyhydroxyalkanoates: Properties and chemical modification approaches for their functionalization. *Biotechnology Progress*, 34(1), 29–41. <https://doi.org/10.1002/btpr.2565>
- Ren SY, Ni HG [2023]. Biodeterioration of Microplastics by Bacteria Isolated from Mangrove Sediment. *Toxics*, 11(5), 432. <https://doi.org/10.3390/toxics11050432>
- Rodprasert W, Toppari J, Virtanen HE [2021]. Endocrine Disrupting Chemicals and Reproductive Health in Boys and Men. *Frontiers in Endocrinology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fendo.2021.706532>
- Ronkay F, Molnar B, Gere D, Czigany T [2021]. Plastic waste from marine environment: Demonstration of possible routes for recycling by different manufacturing technologies. *Waste Management*, 119, 101–110. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.029>
- Schmaltz E, Melvin EC, Diana Z, Gunady EF, Rittschof D, Somarelli JA, Virdin J, Dunphy-Daly MM [2020]. Plastic pollution solutions: emerging technologies to prevent and collect marine plastic pollution. *Environment International*, 144, 106067. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106067>
- Shah S, Kumar A [2021]. Production and characterization of polyhydroxyalkanoates from industrial waste using soil bacterial isolates. *Brazilian Journal of Microbiology*, 52(2), 715–726. <https://doi.org/10.1007/s42770-021-00452-z>
- Shahhosseini S [2004]. Simulation and optimisation of PHB production in fed-batch culture of *Ralstonia eutropha*. *Process Biochemistry*, 39(8), 963–969. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(03\)00209-7](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(03)00209-7)
- Sun Z, Ramsay JA, Guay M, Ramsay BA [2007]. Fermentation process development for the production of medium-chain-length poly-3-hydroxyalkanoates. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 75(3), 475–485. <https://doi.org/10.1007/s00253-007-0857-4>
- Trakunjae C, Boondaeng A, Apiwatanapiwat W, Janchai P, Neoh SZ, Sudesh K, Vaithanomsat P [2023]. Statistical optimization of P[3HB-co-3HHx] copolymers production by *Cupriavidus necator* PHB–4/pBBR_CnPro-phaCRp and its properties characterization. *Scientific Reports*, 13(1), 9005. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36180-7>
- Umesh M, Sankar SA, Thazeem B [2021]. Fruit Waste as Sustainable Resources for Polyhydroxyalkanoate (PHA) Production. In *Bioplastics for Sustainable Development* (pp. 205–229). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-1823-9_7
- Vicente D, Proença DN, Morais PV [2023]. The Role of Bacterial Polyhydroalkanoate (PHA) in a Sustainable Future: A Review on the Biological Diversity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(4), 2959. <https://doi.org/10.3390/ijerph20042959>
- Walker TR, Fequet L [2023]. Current trends of unsustainable plastic production and micro[nano]plastic pollution. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 160, 116984. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.116984>
- Wang Q, Zhang C, Li R [2023]. Plastic pollution induced by the COVID-19: Environmental challenges and outlook. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(14), 40405–40426. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24901-w>
- Webb HK, Arnott J, Crawford J, Ivanova EP [2013]. Plastic Degradation and Its Environmental Implications with Special Reference to Poly(ethylene terephthalate). *Polymers*, 2013; 5(1):1-18. <https://doi.org/10.3390/polym5010001>