

## Los polihidroxicanoatos como una alternativa para reducir el impacto ambiental ocasionado por los plásticos convencionales

### Polyhydroxyalkanoates as an alternative for reducing the environmental impact caused by conventional plastics

J.D. Castilla-Marroquín <sup>a</sup>, F. Hernández-Rosas <sup>a</sup>, J.A. Herrera-Corredor <sup>a</sup>, N. Pacheco-López <sup>b</sup>,

R. Hernández-Martínez <sup>c,\*</sup>

<sup>a</sup> Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Federal Córdoba-Veracruz km 348, Manuel León, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C. P. 94953.

<sup>b</sup> CIATEJ (Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco Tablaje Catastral 31264 Km 5.5 Carretera Sierra Papacal-Chuburna Puerto Parque Científico Tecnológico de Yucatán CP: 97302 Mérida, Yucatán, México

<sup>c</sup> SECIHTI- Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Federal Córdoba-Veracruz km 348, Manuel León, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C. P. 94953.

#### Resumen

Los plásticos convencionales han generado graves problemas ambientales. Más de 380 millones de toneladas anuales de residuos plásticos terminan en los ecosistemas terrestres y marinos. Además, terminan inmersos, como microplásticos, en la cadena alimentaria humana. Ante esta problemática, los bioplásticos, como los polihidroxicanoatos, surgen como una alternativa sostenible, ya que, debido a sus características, como fácil biodegradabilidad, son adecuados para ser utilizados en industrias tales como la alimentaria, biomédica y agroindustrial en general. Por lo tanto, representan una alternativa para reducir la dependencia a los plásticos convencionales. Sin embargo, actualmente, la industria de los bioplásticos enfrenta retos como altos costos de producción y falta de conciencia pública. El uso de materias primas de bajo costo, como los coproductos agroindustriales, la creación de políticas de apoyo y programas orientados a la investigación, desarrollo y difusión de estos biopolímeros podría favorecer su disponibilidad, fomentar su uso desplazando así los plásticos convencionales y al mismo tiempo reducir los costos de producción.

*Palabras Clave:* Biopolímeros, microplásticos, plásticos convencionales, biodegradable

#### Abstract

Conventional plastics have generated uncontrollable environmental problems. Over 380 million tons annually of plastic waste are dumped in terrestrial and marine ecosystems. They also end up immersed, as microplastics, in the human food chain. Given this problem, bioplastics, such as polyhydroxyalkanoates, emerge as a sustainable alternative, since they possess properties, like easy biodegradability, that make them suitable for industrial applications in the food, biomedical and agro-industrial industries. Therefore, they are an alternative to reduce the dependence on conventional plastics. However, the bioplastic industry currently faces challenges such as high production costs and lack of public awareness. The use of low-cost raw materials, such as agro-industrial co-products, and the creation of support policies and programs aimed at research, development, and dissemination of these biopolymers could favor their availability, encourage their use instead of conventional plastics, and at the same time reduce production costs.

*Keywords:* Biopolymers, microplastics, conventional plastics, biodegradable.

\*Autor para la correspondencia: odracirhema@gmail.com

Correo electrónico: castillamarroquinjesusdavid@gmail.com (Jesús D. Castilla-Marroquín), fhrosas@colpos.mx (Francisco Hernández-Rosas), jandreshc@colpos.mx (José A. Herrera-Corredor), npacheco@ciatej.mx (Neith A. Pacheco-López), odracirhema@gmail.com (Ricardo Hernández-Martínez)

## 1. Introducción

Según estimaciones recientes, anualmente se generan 359 millones de toneladas de plásticos, mientras que se desechan alrededor de 400 millones de toneladas, evidenciando el creciente desbalance en el manejo de estos residuos. (Pilapitiya y Ratnayake, 2024). Durante la pandemia de COVID-19, el uso intensivo de productos desechables, en particular plásticos de un solo uso, incrementó notablemente la generación de residuos. Este aumento reflejó no solo una mayor dependencia de estos materiales, sino también la falta de medidas efectivas para su gestión a escala global (Nghiem *et al.*, 2021). Sin embargo, el problema no se limita al mal manejo de los residuos plásticos, ya que una gran parte de estos desechos termina dispersándose en el ambiente lo que afecta ecosistemas terrestres y marinos (Ita-Nagy *et al.*, 2022). Además de la dispersión de residuos en el ambiente, el manejo inadecuado de los plásticos sigue siendo un factor central, junto con la limitada participación ciudadana en prácticas como la separación, reciclaje o disposición adecuada. Ambos aspectos han contribuido a que la generación de residuos ocurra a un ritmo que excede la capacidad del ambiente para degradarlos de forma natural (MacLeod *et al.*, 2021).

### 2. ¿Qué sucede con los plásticos convencionales?

El plástico que llega al ambiente, especialmente a los ecosistemas marinos, no desaparece fácilmente. En el océano, es arrastrado por las corrientes y en ocasiones queda atrapado entre formaciones rocosas, donde la fricción mecánica y la exposición al sol favorecen su fragmentación en partículas pequeñas, conocidas como microplásticos (Wang *et al.*, 2023). Este fenómeno impacta a los ecosistemas marinos, ya que los microplásticos se incorporan a la cadena alimentaria. Como muestra la Figura 1, el zooplancton puede ingerir estas partículas, y a partir de él, los microplásticos se transfieren a peces de mayor tamaño, incluidos algunos de consumo humano, lo que genera preocupación por su posible acumulación en la cadena alimentaria (Bai *et al.*, 2021). El problema se hace mayor por el hecho de que los microplásticos no son eliminados en las heces de los peces, de hecho, sucede lo contrario, una vez ingeridos permanecerán de por vida en el pez (Chemello *et al.*, 2023).

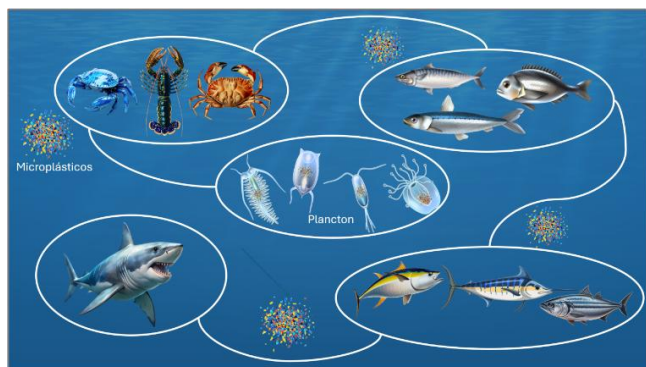


Figura 1. Consumo escalonado de microplásticos en la cadena alimentaria marina. Fuente: Elaboración por los autores con información de Bai *et al.*, 2021.

#### 2.1. Microplásticos en alimentos marinos y riesgo de consumo humano

A nivel mundial, alrededor del 20 % de la proteína animal consumida proviene de productos pesqueros, por lo que la presencia de microplásticos en el ambiente marino podría representar un riesgo directo para los seres humanos (Makhdoumi *et al.*, 2023). Existen estudios que han detectado microplásticos en diversos organismos marinos destinados al consumo, entre ellos camarones, cangrejos, sardinas, atunes y bacalao, entre otros (Thushari y Senevirathna, 2020).

Esta exposición, como se muestra en la Figura 2, está relacionada con el hecho de que muchas zonas de pesca comercial coinciden con áreas donde las corrientes oceánicas arrastran y concentran residuos plásticos (NOAA, 2022; UNSTATS, 2022; FAO, 2024).

De manera particular, algunos estudios han reportado mayores concentraciones de microplásticos en productos enlatados como atún y sardina, lo cual podría deberse a una mayor susceptibilidad a la contaminación durante el procesamiento industrial (Di Giacinto *et al.*, 2023).

Ante esta situación, se han propuesto alternativas más sostenibles que permitan reducir el uso de plásticos convencionales no biodegradables. Biomateriales como el ácido poliláctico (PLA) y los polihidroxicanoatos (PHAs) ofrecen un alto potencial como sustitutos, ya que provienen de fuentes naturales y generan un menor impacto ambiental (Naser *et al.*, 2021; Millican y Agarwal, 2021).

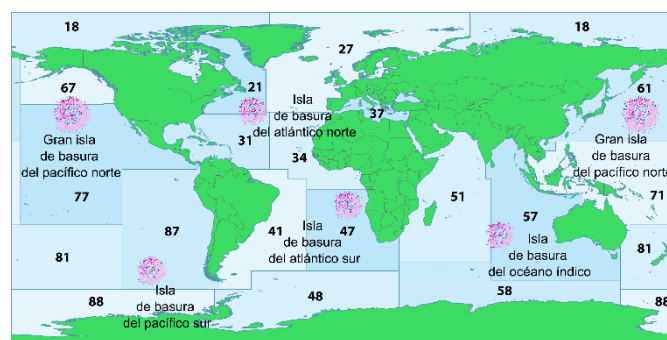


Figura 2. Islas de basura identificadas alrededor del mundo y su ubicación aproximada dentro de las zonas de pesca comercial de la FAO. Fuente: Elaboración por los autores con datos de NOAA, 2022; UNSTATS, 2022 y FAO, 2024

### 3. Bioplásticos: ¿una solución al problema del plástico?

Los PHAs son bioplásticos producidos por microorganismos, quienes los generan como una forma de almacenar energía (Koller y Mukherjee, 2022). Estos compuestos pueden reemplazar ciertos plásticos derivados del petróleo, ya que son biodegradables, es decir, pueden descomponerse de forma natural sin dejar residuos tóxicos.

Esta capacidad de biodegradarse se debe a la acción de organismos como bacterias y hongos, que los transforman en compuestos simples como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua (Koller y Rittmann, 2022).

Además, los PHAs se consideran biobasados, ya que se fabrican a partir de recursos renovables como el almidón o coproductos agroindustriales. También son biocompatibles, lo que significa que pueden utilizarse dentro del cuerpo humano sin causar daño ni rechazo (Ladhari *et al.*, 2023).

Otra ventaja importante es que estos bioplásticos tienen propiedades físicas similares a las de muchos plásticos comunes: son flexibles, resistentes, moldeables, impermeables

y pueden actuar como barrera, lo que los hace útiles en una gran variedad de productos cotidianos (Kaniuk y Stachewicz 2021).

### 3.1. ¿Cómo se producen los bioplásticos naturales?

Las bacterias poseen la capacidad de producir bioplásticos, para llevar a cabo este proceso, utilizan materiales orgánicos como residuos de frutas, vegetales o subproductos de la industria agroalimentaria, es decir, fuentes renovables que de otro modo serían desechadas (Koller y Rittmann, 2022).

Una forma sustentable para producir estos bioplásticos es aprovechar residuos agroindustriales como la melaza, que es un coproducto de la industria cañera.

La melaza es un líquido espeso y oscuro que se obtiene en la última etapa del proceso de producción de azúcar. Contiene azúcares y nutrientes, que pueden ser aprovechados por bacterias para producir los bioplásticos (De Paula et al., 2021; Kairul et al., 2022). Este tipo de aprovechamiento representa una alternativa económica y ambientalmente amigable, ya que permite transformar un residuo en un material útil (Hierro-Iglesias et al., 2022).

¿Cómo lo logran estas bacterias? Cuando se encuentran en un ambiente con abundante alimento, como los azúcares presentes en la melaza, pero con escasez de nitrógeno, en lugar de reproducirse, las bacterias almacenan el exceso de energía en su interior. Lo hacen formando estructuras sólidas, es decir los bioplásticos, que funcionan como reservas de energía que podrán usar más adelante cuando el entorno no sea favorable (Samrot et al., 2021).

Este proceso natural puede reproducirse en laboratorios o plantas industriales bajo condiciones controladas. Así, gracias a estos microorganismos, es posible convertir un residuo agrícola en un bioplástico útil, biodegradable y con menor impacto ambiental (Koller y Rittmann, 2022).

### 3.2. Bondades de los bioplásticos

La biodegradabilidad es la característica más destaca de estos bioplásticos, ya que, como se observa en la Figura 3, pueden reintegrarse al ambiente en un periodo de 1 mes a 3.5 años, lo cual es significativamente menor a los 100 a 1000 años que requiere un plástico convencional para degradarse (Amabile et al., 2024).

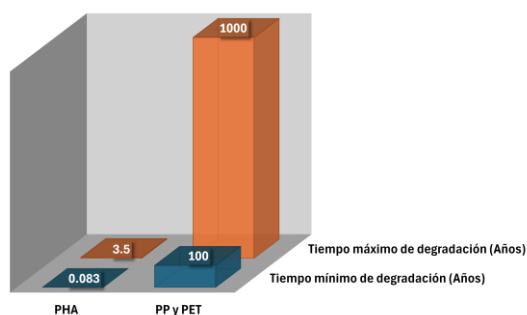


Figura 3. Comparativa del tiempo de degradabilidad de PHAs, PP y PET. Fuente: Elaboración por los autores con datos de Amabile et al., 2024)

Otra característica importante es su compostabilidad, ya que al llegar al final de su vida útil puede ser desechado como un producto orgánico, lo que aumenta notablemente su

degradabilidad (Koller y Mukherjee, 2022). Al ser un material que se comporta como un plástico convencional ha atraído el interés de sectores como el cuidado de la salud, la industria alimentaria, agrícola, biomédica y la nanotecnología (Yadav et al., 2021), en la Figura 4 se muestran productos que se comercializan en la actualidad y que son elaborados con bioplásticos.

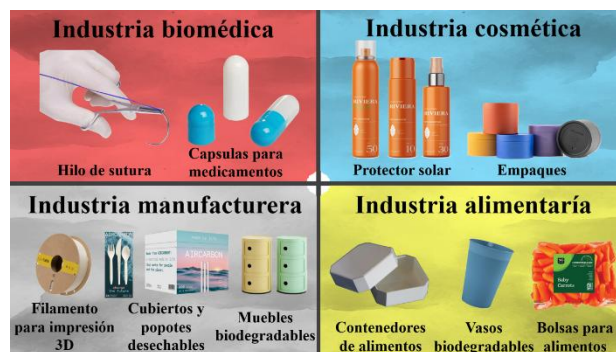


Figura 4. Productos comerciales elaborados con bioplásticos. Fuente: Elaboración por los autores usando datos de Yadav et al., 2021; Kalia et al., 2023; Vigneswari et al., 2024 y Park et al., 2024.

Se destacan aplicaciones en el área biomédica, como capsulas para medicamentos, implantes auditivos, hilos de sutura, mallas quirúrgicas, ingeniería de tejidos óseos e implantes coronarios (Kalia et al., 2023). Diversos sectores usan estos biopolímeros para fabricar adhesivos biodegradables, resinas compuestas de madera y PHAs, para elaborar textiles, como ingredientes para cosméticos, como materia prima para elaborar utensilios desechables (tenedores, cucharas, popotes), entre otras aplicaciones (Vigneswari et al., 2024; Park et al., 2024). La tabla 1 muestra algunas de las compañías que comercializan PHAs y sus aplicaciones actuales en el mercado. Como se puede observar, estos bioplásticos están presentes en diversos sectores del mercado, los podemos encontrar desde la hostelería hasta la industria cosmética. Sin embargo, existe una tendencia en las aplicaciones agrícolas, alimentarias y médicas, lo que se alinea con la capacidad de biodegradación de estos biopolímeros y su biocompatibilidad para aplicaciones en seres humanos.

Tabla 1.- Empresas comercializadoras de bioplásticos a nivel mundial.

Compañía	Producto comercial	Aplicación
Yield10 Bioscience	Metabolix®	Película degradable para cultivos agrícolas
Braun	Monomax®	Suturas y mallas quirúrgicas
Danimer Scientific	Nodax™	Utensilios desechables y textiles
Newlight Technologies	AirCarbon™	Utensilios desechables
Biocycle	Biocylce®	Bolsas compostables
Polyferm	VersaMer™	Adhesivos y recubrimientos biodegradables
Shenzhen Ecomann Biotechnology	Ecomann®	Filamentos para impresión 3d de prótesis médicas y microesferas exfoliantes faciales

Kaneka Corporation	AONILEX®	Envoltorio de alimentos frescos y mantas agrícolas para cultivos
Bio-ON	MINERV-PHB™	Cremas faciales, protectores solares y cápsulas de liberación gradual

Costo de producción	\$7.6-\$11.9 USD/Kg	\$1.05-\$1.55 USD/Kg	\$0.38-\$0.52 USD/Kg
---------------------	---------------------	----------------------	----------------------

Fuente: Elaboración propia con datos de Millican et al., 2021, Nghiem et al., 2021, Naser et al., 2021)

Fuente: Elaboración propia con datos (Yadav et al., 2021; Kalia et al., 2023; Vigneswari et al., 2024 y Park et al., 2024).

### 3.3. Diferencias entre polímeros biobasados y bioplásticos

Los polímeros biobasados como el bio-poliestireno y el bio-PET son materiales que derivan de materia prima como bio-etileno producido a partir de bioetanol de caña de azúcar (Siracusa et al., 2020). Sin embargo, la composición de estos materiales es químicamente idéntica a la de sus homólogos de origen fósil por lo que representan el mismo problema de persistencia y generación de microplásticos (Shi et al., 2025). se destaca que la baja degradabilidad de los polímeros convencionales se debe a la presencia de enlaces covalentes y ausencia de enlaces débiles en el PP y la presencia de compuestos cíclicos como el benceno en el PET (Dindar, 2025). En contraste, como se muestra en la Figura 5 los polihidroxicanoatos presentan una estructura química diferente y esta composición favorece su biodegradabilidad al entrar en contacto con microorganismos capaces de aprovechar a los PHAs como fuente de carbono (Paloyan et al., 2025).

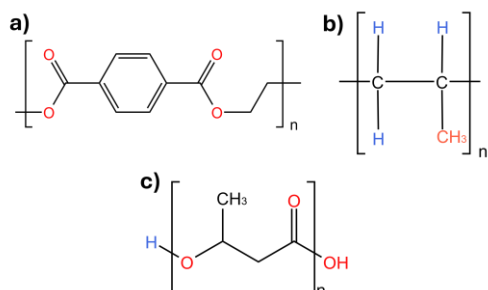


Figura 5. Estructura general de a) PET, b), PP y c) PHAs. Fuente: Elaboración propia con datos de Paloyan et al., 2025 y Dindar, 2025.

La tabla 2 presenta una comparación entre los PHAs y el polipropileno (PP) y el PET, en donde se contrastan estos materiales en aspectos como la materia prima requerida para su producción, la huella de carbono, tiempo de biodegradación y huella de carbono

Tabla 2. Análisis comparativo: Plásticos convencionales (PP y PET) vs. Bioplásticos (Polihidroxicanoatos).

Características	PHAs	PP	PET
Materia prima	Almidón, caña de azúcar, coproductos agroindustriales	Petróleo, gas natural	Petróleo
Huella de carbono	Baja	Elevada	Elevada
Tiempo de biodegradación	1 mes a 3.5 años	100-1000 años	100-1000 años

### 4. Retos para la industria de los bioplásticos

Los costos de producción son el reto mayor para estos biopolímeros, por esta razón se buscan alternativas como el aprovechamiento de coproductos agroindustriales con el objetivo de reducir costos (Andhalkar et al., 2023). También es necesario considerar que su degradación depende de la presencia de microorganismos capaces de producir enzimas que hidrolicen los PHAs, así como de condiciones favorables, siendo factores importantes el pH, la temperatura y la salinidad. (Paloyan et al., 2025). Simultáneamente, es necesario estandarizar procesos orientados a la biodegradación controlada de estos bioplásticos, algunas estrategias para este fin son la degradación natural y el compostaje industrial, siendo este último un cuello de botella ya que se requieren tiempos de compostaje de 4 a 18 semanas y muchas regiones carecen de la infraestructura necesaria para realizar este proceso (Millican et al., 2021).

Otro reto por tomar en cuenta es la falta de iniciativas para concientizar a la población sobre los beneficios relacionados al uso de los bioplásticos. Existen grupos en internet enfocados a proporcionar información sobre las bondades de los bioplásticos, organizaciones como Go!PHA (2022), llamada Global Organization for PHA, está constituida por productores de materiales, dueños de empresas, instituciones académicas, organizaciones de manejo de residuos, emprendedores y fundaciones ambientales, cuyo objetivo es compartir el conocimiento sobre materiales biobasados con miras a la creación de leyes que impulsen investigaciones para acelerar el desarrollo y comercialización de estos bioplásticos.

Por lo tanto, los retos son variados, sin embargo, debemos trabajar para aumentar el conocimiento del público con respecto a los bioplásticos, para aprovechar sus bondades y permitirnos al mismo tiempo reducir el uso de plásticos derivados del petróleo.

### 5. Conclusión

La contaminación generada por los plásticos convencionales nos ha llevado a la búsqueda de soluciones innovadoras que permitan reducir el consumo de estos polímeros. Bioplásticos como los PHAs surgen como una alternativa sustentable gracias a la posibilidad de poder producirlos a partir de recursos renovables. Además, su versatilidad permite su aplicación en diferentes industrias, lo que podría favorecer la reducción en el uso de plásticos convencionales. Sin embargo, su éxito depende de esfuerzos coordinados entre los investigadores, que permitan conocer más sobre estos biopolímeros, la industria, para permitir que estos bioplásticos se aprovechen en la elaboración de biomateriales y las políticas públicas, que incentiven su uso. También es importante la difusión de información en un lenguaje sencillo, para permitir que estos bioplásticos estén presentes en la memoria de la población general y por consecuencia, busquen de manera consciente impulsar y exigir su uso cotidiano.

## Agradecimientos

Jesús David. Castilla Marroquín agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por la beca número 858814 y por el proyecto IxM número 331

## Referencias

- Amabile, C., Abate, T., Muñoz, R., Chianese, S., & Musmarra, D. (2024). Production of poly(3-hydroxybutyrate) and poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) from methane and volatile fatty acids: properties, metabolic routes and current trend. *The Science of the Total Environment*, *927*, 172138. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172138>
- Andhalkar, V. V., Foong, S. Y., Kee, S. H., Lam, S. S., Chan, Y. H., Djellabi, R., Bhubalan, K., Medina, F., & Constantí, M. (2023). Integrated Biorefinery Design with Techno-Economic and Life Cycle Assessment Tools in Polyhydroxyalkanoates Processing. *Macromolecular Materials and Engineering*, *308*(11). <https://doi.org/10.1002/mame.202300100>
- Bai, Z., Wang, N., & Wang, M. (2021). Effects of microplastics on marine copepods. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *217*, 112243. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112243>
- Chemello, G., Trotta, E., Notarstefano, V., Papetti, L., Di Renzo, L., Matiddi, M., Silvestri, C., Carnevali, O., & Gioacchini, G. (2023). Microplastics evidence in yolk and liver of loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*), a pilot study. *Environmental Pollution*, *337*, 122589. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122589>
- De Paula, C. B. C., De Paula-Elias, F. C., Rodrigues, M. N., Coelho, L. F., De Oliveira, N. M. L., De Almeida, A. F., & Contiero, J. (2021). Polyhydroxyalkanoate Synthesis by Burkholderia glumae into a Sustainable Sugarcane Biorefinery Concept. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *8*. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.631284>
- Dindar, E. (2025). Impact of microplastic contamination on phosphorus availability, alkaline phosphatase activity, and polymer degradation in soil. *Polymers*, *17*(12), 1586. <https://doi.org/10.3390/polym17121586>
- Di Giacinto, F., Di Renzo, L., Mascilongo, G., Notarstefano, V., Gioacchini, G., Giorgini, E., Bogdanović, T., Petričević, S., Listeš, E., Brkljača, M., Conti, F., Profico, C., Zambuchini, B., Di Francesco, G., Giansante, C., Diletti, G., Ferri, N., & Berti, M. (2023). Detection of microplastics, polymers and additives in edible muscle of swordfish (*Xiphias gladius*) and bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) caught in the Mediterranean Sea. *Journal of Sea Research*, *192*, 102359. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2023.102359>
- FAO. (2024). *FAO major fishing areas*. Fisheries and Aquaculture. Retrieved February 18, 2025, from <https://www.fao.org/fishery/en/area/search>
- GO!PHA. (2022). *About GO!PHA*. GO!PHA. Retrieved March 6, 2025, from <https://www.gopha.org/who-we-are>
- Hierro-Iglesias, C., Chimphango, A., Thornley, P., & Fernández-Castané, A. (2022). Opportunities for the development of cassava waste biorefineries for the production of polyhydroxyalkanoates in Sub-Saharan Africa. *Biomass and Bioenergy*, *166*, 106600. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106600>
- Ita-Nagy, D., Vázquez-Rowe, I., & Kahhat, R. (2022). Developing a methodology to quantify mismanaged plastic waste entering the ocean in coastal countries. *Journal of Industrial Ecology*, *26*(6), 2108–2122. <https://doi.org/10.1111/jiec.13349>
- Kalia, V. C., Patel, S. K. S., & Lee, J. (2023). Exploiting polyhydroxyalkanoates for biomedical applications. *Polymers*, *15*(8), 1937. <https://doi.org/10.3390/polym15081937>
- Kaniuk, Ł., & Stachewicz, U. (2021). Development and advantages of biodegradable PHA polymers based on electrospun PHBV fibers for tissue engineering and other biomedical applications. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, *7*(12), 5339–5362. <https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.1c00757>
- Khairul, S. M., Mahyudin, N. A., Abas, F., Jamaludin, N., & Rashid, N. K. M. A. (2022). THE PROXIMATE COMPOSITION AND METABOLITE PROFILING OF SUGARCANE (*Saccharum officinarum*) MOLASSES. *Malaysian Applied Biology*, *51*(2), 63–68. <https://doi.org/10.55230/mabjournal.v5i2.2259>
- Koller, M., & Mukherjee, A. (2022). A new wave of industrialization of PHA biopolyesters. *Bioengineering*, *9*(2), 74. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9020074>
- Koller, M., & Rittmann, S. K. (2022). Haloarchaea as emerging big players in future polyhydroxyalkanoate bioproduction: Review of trends and perspectives. *Current Research in Biotechnology*, *4*, 377–391. <https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2022.09.002>
- Ladhari, S., Vu, N., Boisvert, C., Saidi, A., & Nguyen-Tri, P. (2023). Recent development of Polyhydroxyalkanoates (PHA)-Based materials for Antibacterial applications: A review. *ACS Applied Bio Materials*, *6*(4), 1398–1430. <https://doi.org/10.1021/acsbm.3c00078>
- MacLeod, M., Arp, H. P. H., Tekman, M. B., & Jahnke, A. (2021). The global threat from plastic pollution. *Science*, *373*(6550), 61–65. <https://doi.org/10.1126/science.abg5433>
- Makhdoumi, P., Hossini, H., & Pirsasb, M. (2021). A review of microplastic pollution in commercial fish for human consumption. *Reviews on Environmental Health*, *38*(1), 97–109. <https://doi.org/10.1515/revveh-2021-0103>
- Millican, J. M., & Agarwal, S. (2021). Plastic pollution: a material problem? *Macromolecules*, *54*(10), 4455–4469. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.0c02814>
- Nghiem, L. D., Iqbal, H. M., & Zdartar, J. (2021). The shadow pandemic of single use personal protective equipment plastic waste: A blue print for suppression and eradication. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, *4*, 100125. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2021.100125>
- Naser, A. Z., Deiab, I., & Darras, B. M. (2021). Poly(lactic acid) (PLA) and polyhydroxyalkanoates (PHAs), green alternatives to petroleum-based plastics: a review. *RSC Advances*, *11*(28), 17151–17196. <https://doi.org/10.1039/d1ra02390j>
- NOAA. (2022). *Marine microplastic concentrations*. National Centers for Environmental Information (NCEI). Retrieved February 14, 2025, from: [https://experience.arcgis.com/experience/b296879cc1984fda833a8acc93e31476/page/Page/?views=DataInformation%2CSample#d ata\\_s=id%3ADataSource\\_1-18cf9a85fdd-layer-4%3A3857](https://experience.arcgis.com/experience/b296879cc1984fda833a8acc93e31476/page/Page/?views=DataInformation%2CSample#d ata_s=id%3ADataSource_1-18cf9a85fdd-layer-4%3A3857)
- Paloyan, A., Tadevosyan, M., Ghevondyan, D., Khojetsyan, L., Karapetyan, M., Margaryan, A., Antranikian, G., & Panosyan, H. (2025). Biodegradation of polyhydroxyalkanoates: current state and future prospects. *Frontiers in Microbiology*, *16*, 1542468. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1542468>
- Park, H., He, H., Yan, X., Liu, X., Scrutton, N. S., & Chen, G. (2024). PHA is not just a bioplastic! *Biotechnology Advances*, *71*, 108320. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2024.108320>
- Pilapitiya, P. N. T., & Ratnayake, A. S. (2024). The world of plastic waste: A review. *Cleaner Materials*, *11*, 100220. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100220>
- Samrot, A. V., Samanvitha, S. K., Shobana, N., Renitta, E. R., Senthilkumar, P., Kumar, S. S., Abirami, S., Dhiva, S., Bavanilatha, M., Prakash, P., Saigeetha, S., Shree, K. S., & Thirumurugan, R. (2021). The Synthesis, Characterization and Applications of Polyhydroxyalkanoates (PHAs) and PHA-Based Nanoparticles. *Polymers*, *13*(19), 3302. <https://doi.org/10.3390/polym13193302>
- 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>
- Shi, X., Cui, L., Xu, C., & Wu, S. (2025). Next-Generation Bioplastics for food Packaging: Sustainable materials and Applications. *Materials*, *18*(12), 2919. <https://doi.org/10.3390/ma18122919>
- Siracusa, V., & Blanco, I. (2020). Bio-Polyethylene (Bio-PE), Bio-Polypropylene (Bio-PP) and Bio-Poly(ethylene terephthalate) (Bio-PET): Recent Developments in Bio-Based Polymers Analogous to Petroleum-Derived Ones for Packaging and Engineering Applications. *Polymers*, *12*(8), 1641. <https://doi.org/10.3390/polym12081641>
- Thushari, G., & Senevirathna, J. (2020). Plastic pollution in the marine environment. *Heliyon*, *6*(8), e04709. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04709>
- UNSTATS. (2022). *SDG reports Goal 14*. United Nations Statistics Division. Retrieved February 18, 2025, from <https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/goal-14/>
- Vigneswari, S., Noor, M. S. M., Amelia, T. S. M., Balakrishnan, K., Adnan, A., Bhubalan, K., Amirul, A. A., & Ramakrishna, S. (2021). Recent Advances in the Biosynthesis of Polyhydroxyalkanoates from

- Lignocellulosic Feedstocks. *Life*, 11(8), 807. <https://doi.org/10.3390/life11080807>
- Wang, L., Bank, M. S., Rinklebe, J., & Hou, D. (2023). Plastic–Rock complexes as hotspots for microplastic generation. *Environmental Science & Technology*, 57(17), 7009–7017. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c00662>
- Yadav, B., Talan, A., Tyagi, R., & Drogui, P. (2021). Concomitant production of value-added products with polyhydroxyalkanoate (PHA) synthesis: A review. *Bioresource Technology*, 337, 125419. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125419>