

El papel de los microorganismos en la biodegradación de plásticos

Andrés Méndez Zamora
María Marcela Robles Machuca
Alejandro Pereira Santana
Leticia Casas Godoy

Artículo

El papel de los microorganismos en la biodegradación de plásticos

Cómo citar este artículo: Méndez-Zamora A, Robles-Machuca MM, Pereira-Santana A, Casas-Godoy L. 2023. El papel de los microorganismos en la biodegradación de plásticos. Revista Ciencia y Naturaleza (1078).



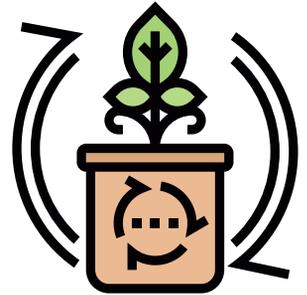


Plásticos y su descomposición por microorganismos

Jimagina tu vida sin plásticos ¿es difícil verdad? El uso y las derivaciones de productos plásticos juegan un papel fundamental en nuestra rutina diaria. Sin embargo, su uso extensivo y la falta del manejo de estos residuos han generado un gran problema ambiental. Aunque existen diversas soluciones como el uso de vertederos, incineración, reciclaje químico y reciclaje físico, cada una de estas tiene pros y contras.



En este contexto, el proceso llamado Biodegradación (ver cuadro de conceptos), que se refiere al consumo de plásticos por parte de los microorganismos, se destaca como una solución relativamente nueva y poco estudiada para esta problemática.



En la actualidad, se han identificado diversos microorganismos capaces de descomponer diferentes tipos de plásticos. No obstante, hoy en día no existen tecnologías de biodegradación robustas y masivas que permitan brindar una solución real ante esta problemática de los residuos plásticos. En este artículo se aborda la problemática de los residuos plásticos, las alternativas actuales para su manejo y el papel de los microorganismos como una alternativa para dar solución a este problema global.

Un gran científico dijo una vez...

“ **Mira profundamente en la naturaleza y entonces comprenderás todo mejor** ”

Cuan sabia es la frase y la naturaleza misma. Con esta frase Albert Einstein nos hace voltear a ver la gran versatilidad que tiene la vida para seguir su evolución. De hecho, la naturaleza ha encontrado formas de abrirse camino ante la abrumadora contaminación que la asedia. En este contexto, se destacan los plásticos debido a que son relativamente nuevos en el andar de la sociedad, y aun así los seres vivos -en particular los microorganismos-, han logrado modificar su metabolismo para adaptarse a su entorno y poder utilizar a los plásticos como fuentes de nutrientes y energía, y con ello lograr su eliminación del ambiente. Esto nos hace replantearnos las estrategias de solución, echando un vistazo a la naturaleza para proponer soluciones biotecnológicas para nuestros problemas cotidianos.



Los plásticos, un problema a escala mundial

Aunque la producción de plásticos tiene más de 150 años, no fue hasta el 2009 cuando se replanteo un nuevo enfoque en su producción con el objetivo de mejorar su diseño y facilitar la reutilización, separación y reciclaje. Aunado a que están muy difundidos en nuestra rutina diaria, la producción global de plásticos está experimentando un rápido crecimiento, debido a la simpleza de su síntesis, los bajos costos de su producción, su elevada robustez y su alta durabilidad.



Sin embargo, a pesar de estos beneficios mercantiles, el tener una producción en masa y una mala gestión de sus residuos han generado como resultado un problema medioambiental masivo.

En el año 2021, la producción de residuos plásticos alcanzó la asombrosa cifra de 400 millones de toneladas métricas. De hecho, hoy en día, en diversos océanos del mundo existen islas conformadas en su totalidad de residuos plásticos (Figura 1).



La isla en el Océano Pacífico abarca una superficie comparable a la del estado de Texas, lo cual son kilómetros y kilómetros de metros cuadrados afectando un sinnúmero de seres vivos marítimos. Si esto no es desalentador, se proyecta que este número se multiplique por más de 94 veces (34 mil millones de toneladas métricas) en el 2050.



La cantidad de plástico en los océanos supera en seis veces la cantidad de plancton; el cual es un conjunto de microorganismos acuáticos que establecen importantes redes tróficas para el desarrollo de la vida. Un dato interesante es que a este conjunto de microorganismos se les atribuye la producción del 50% del oxígeno que respiramos los seres vivos ¿ves cómo nos afecta directamente?

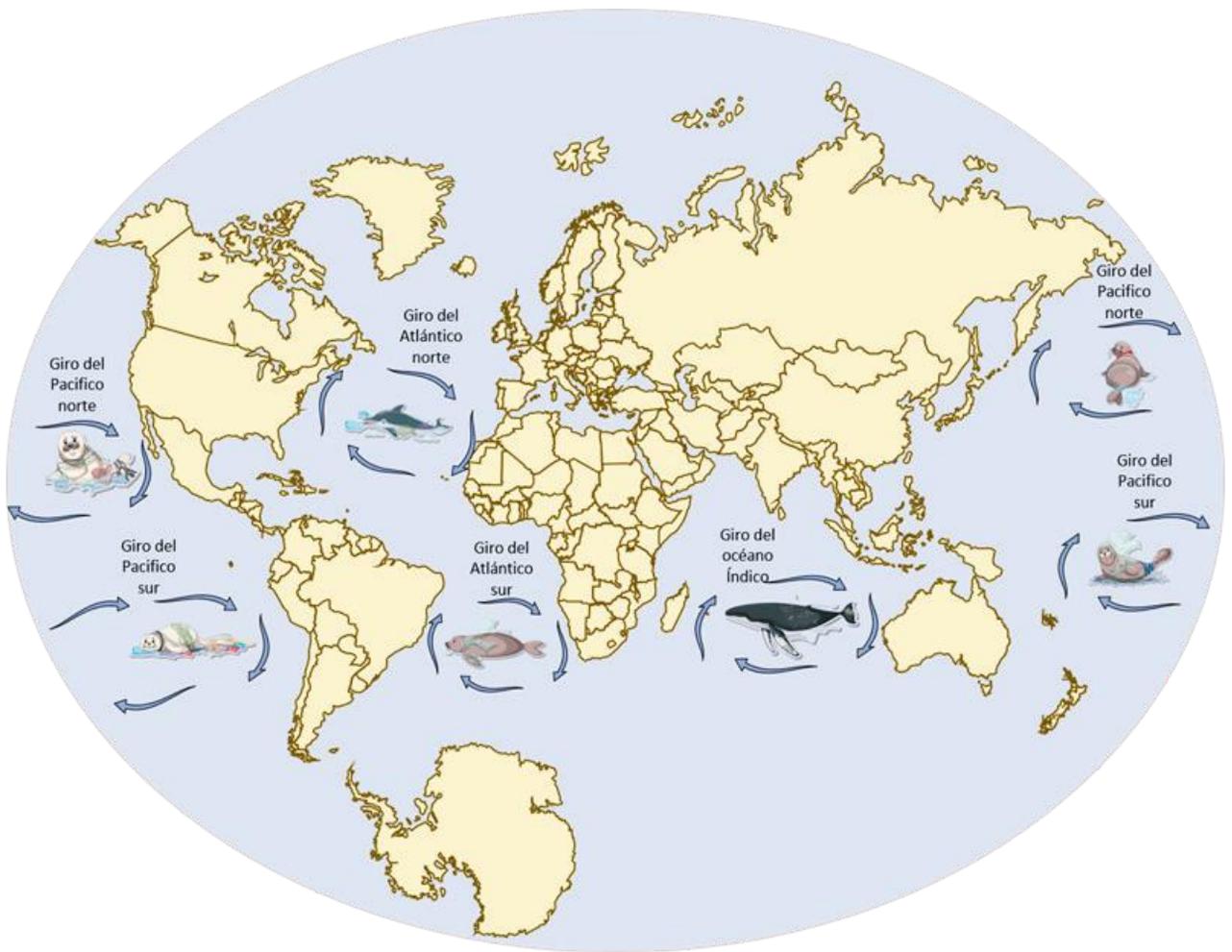
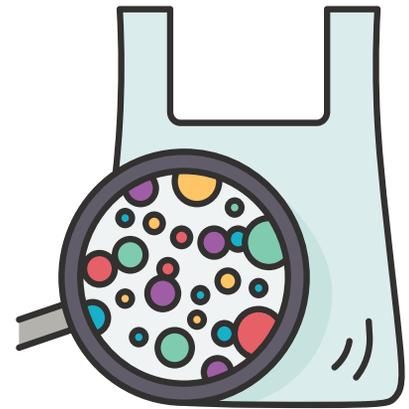


Figura 1. Diferentes islas de basura plástica en todo el mundo generadas por las corrientes marítimas. La imagen de cada animal en el mapa representa la ubicación de cada una de las islas a lo largo del océano.



Aunque estos impactos son terribles, el problema crece cuando los plásticos se fragmentan por el efecto del sol, por los cambios de temperatura y el oleaje, lo que resulta en la formación de los **microplásticos**.

Los microplásticos son partículas diminutas de plásticos que son fáciles de ingerir por los animales y los seres humanos, y lo único que nuestros cuerpos logran hacer es acumularlo en las células. Como consecuencia de la bioacumulación de plásticos en los organismos, estudios recientes reportan efectos nocivos para la salud y el desarrollo como, por ejemplo: efectos neurotóxicos, disminución de la respuesta del sistema inmune, efectos cancerígenos, entre otros.



¿Qué soluciones hay?

Los métodos predominantes para la gestión de los desechos plásticos comprenden principalmente 1) vertido en basureros, 2) incineración y 3) reciclaje (tanto mecánico como químico). Sin embargo, cada una de estas soluciones tiene un impacto negativo en el ambiente.



Por ejemplo, aunque el uso de vertederos es la opción más factible económicamente hablando, se requiere de una extensa cantidad de terreno para su ejecución, además como consecuencia se generan diversos problemas medioambientales en las zonas cercanas.



La incineración, aunque reduce la demanda de vertederos y tiene una recuperación energética térmica, también produce contaminantes secundarios, como metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono, amoníaco, ácido acético, etileno, y otros más, los cuales tienen un impacto en la salud humana, provocando problemas respiratorios, envenenamientos, daño al sistema nervioso. Además, algunas de estas sustancias son gases de efecto invernadero, lo que también afecta negativamente al medio ambiente.



Por otro lado, si bien el reciclaje mecánico es el preferido para reutilizar desechos termoplásticos, las propiedades mecánicas están significativamente comprometidas con respecto al número de ciclos de reciclaje, lo que limita su uso en posteriores aplicaciones. En cuanto al reciclaje químico, aunque tiene la capacidad de recuperar los **monómeros del plástico** (parte principal por la que está formado un plástico), esta depende de la accesibilidad de los procesos y de la eficiencia de los catalizadores usados para ello.



Desafortunadamente se ha reportado la acumulación de subproductos tóxicos en diversos plásticos, como por ejemplo, di toxinas, bisfenol, cloruro de vinilo, perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS tóxicas), provocando problemas al sistema nervioso de las personas, e incluso enfermedades como cáncer y leucemia.



Si bien el reciclaje ha sido reconocido como la solución de gestión de residuos plásticos preferida, el porcentaje que se logra reciclar es bajo (entre el 9 y 12%), mientras que hasta el 79% se destina a vertederos, de los cuales una gran porción llega al medio ambiente y a los océanos.



Microorganismos, la solución está en la naturaleza

La biodegradación es la descomposición química de los materiales por los microorganismos, para lo cual requieren del uso de sus enzimas.

Las **enzimas** son como los engranes de una máquina, y aunque son más complejas que eso, podríamos entenderlo como la unidad principal para que se dé el proceso de biodegradación. Si un microorganismo no posee esta maquinaria no podrá degradar un determinado plástico. De hecho, en los últimos años se ha publicado información sobre la capacidad de diversos microorganismos y sus enzimas en la degradación de diversos plásticos sintéticos.



Sin embargo, cabe destacar que estas investigaciones se han centrado principalmente en la biodegradación de un solo tipo de plástico, el tereftalato de polietileno (PET), es considerado el plástico de un solo uso más comúnmente utilizado en la industria del embalaje. Esto es lógico debido a que cada plástico tiene propiedades fisicoquímicas particulares y características distintivas que dificultan su biodegradación mediante un solo mecanismo universal.





La estrategia inicial y más utilizada ha sido el aislamiento de microorganismos del medio ambiente como suelos de vertederos, películas de plásticos, agua marina, suelo contaminado con petróleo, lodos de aguas residuales, intestinos de gusanos plastificantes, etc. Con ello se ha logrado identificar microorganismos que pueden degradar distintos tipos de plásticos, de entre los cuales se destaca un descubrimiento en 2016, una bacteria llamada "*Ideonella sakaiensis*" con la capacidad de usar el PET como su fuente exclusiva de alimento para crecer (Figura 2). El PET es el material con el que están normalmente hechas las botellas de agua, y es uno de los plásticos más utilizados a nivel mundial. La bacteria lleva a cabo la descomposición gracias a sus enzimas conocidas como PETasa y MEHTasa, que fragmentan el PET en ubicaciones estratégicas, generando así los monómeros que constituyen el plástico y permitiéndole asimilarlo y metabolizarlo.

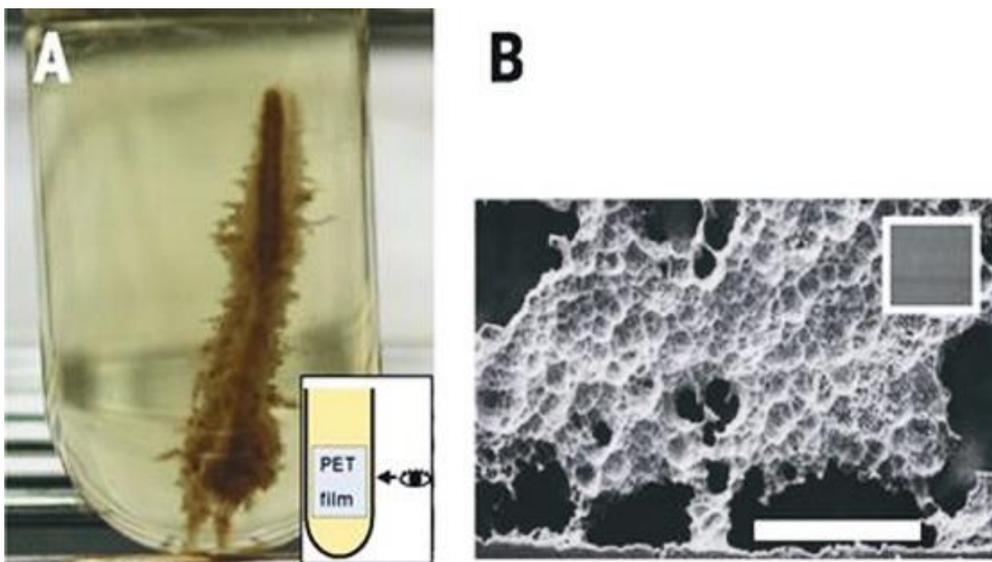


Figura 2. Crecimiento microbiano en PET, A) Desarrollo en lámina de PET después de 20 días, B) Imagen tomada con microscopio de una lámina de PET después de 70 días de en contacto con la bacteria, en el recuadro superior una sin crecimiento microbiano. (Editada de Yoshida *et al.*, 2016)



En particular, los plásticos a menudo permanecen como contaminantes en el entorno durante cientos, e incluso miles, de años. No obstante, a través del tratamiento biológico bajo condiciones adecuadas, es posible acelerar significativamente la descomposición de estos residuos plásticos en un período de tiempo mucho más corto. Por ejemplo, la bacteria *I. sakaiensis* ha demostrado la capacidad de degradar hasta 62 miligramos de productos de hidrólisis de PET en un solo minuto.



Este tipo de descubrimientos ha brindado una nueva alternativa para la búsqueda mediante herramientas computacionales, de enzimas que podrían tener el potencial de descomponer una amplia diversidad de plásticos. De hecho, el uso de herramientas computacionales ha ampliado el margen de posibilidad de encontrar nuevas enzimas con características deseables, incluso, poder mejorar o potenciar dichas capacidades.



Por ejemplo, hay varios trabajos que reportan hasta 6 mil especies microbianas que podrían degradar plásticos basados en **homología de secuencia**, pero aún no han sido verificados experimentalmente la gran mayoría.

Sin embargo, se ha destacado que los rasgos de degradación plástica no se conservan predominantemente por su filogenia, lo cual se traduce en la necesidad de mayor investigación y necesidad de trabajos de investigación con mayor complejidad.



En los procesos de biodegradación de plásticos, una de las características más buscadas en las enzimas es su elevada termoestabilidad, es decir, que puedan resistir altas temperaturas y de esta forma poder trabajar bajo condiciones comunes en la industria plástica. Aunque existen numerosos reportes de biodegradación de plásticos por diversos microorganismos, la efectividad depende de entre otros factores, de las características innatas de cada tipo de plástico, por lo cual existen retos y limitaciones que deben superarse para lograr una efectiva biodegradación.

Retos y limitaciones de la biodegradación

La eficiencia de la biodegradación de polímeros sintéticos por microorganismos está directamente relacionada con propiedades clave como el **peso molecular**, el tamaño, la forma, la **crystalinidad** y el uso de aditivos (Figura 3). Es decir, a mayor complejidad y cristalinidad, más difícil será la biodegradación.



Por otra parte, cuando se realiza la biodegradación en ambientes controlados, en donde se mantiene una temperatura y una humedad constante, se incrementa en gran medida el crecimiento microbiano, y por ende la biodegradación. Veámoslo como si los microorganismos fueran como un rosal, cuando no es cuidado y crece sin agua, luz o abonos, su crecimiento y producción de flores será limitada; mientras que, cuando se le tienen los cuidados como fertilizante, agua y luz, éste podrá aumentar su crecimiento y producción de flores.



La gran mayoría de estudios realizados de biodegradación de plásticos han sido exploratorios a nivel laboratorio, pero han planteado buenas perspectivas para el escalamiento del proceso. De hecho, en el mundo ya existen un par de empresas que usan varias tecnologías de reciclaje antes mencionadas pero centradas en el proceso biológico, la primera es Carbios, que es una empresa francesa fundada en 2011 y en segunda instancia el Proyecto BioICEP, que es una colaboración paneuropeo-china fundada en 2020.

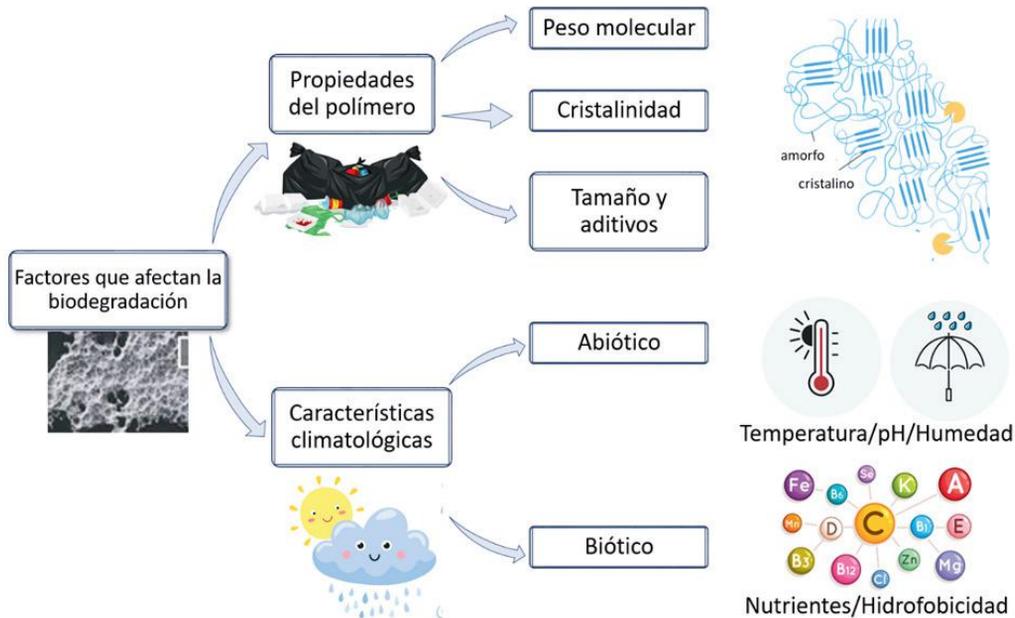


Figura 3. Factores que afectan la biodegradabilidad de los polímeros (Basada en Glaser, 2019).

Aunque los principales plásticos comerciales pueden ser biodegradables en una variedad de circunstancias, aún no queda claro si la biodegradación puede desempeñar una función fundamental en el manejo de los residuos plásticos. Por eso es necesario desarrollar una tecnología de tratamiento suficientemente robusta y masiva, que además sea adaptable a las condiciones de los diferentes entornos donde se requiera el tratamiento.



Esto ha generado e impulsado esfuerzos e incentivación en el desarrollo de tecnologías emergentes, como la denominada “reciclaje biológico o bioreciclaje”.

Perspectivas

La concepción básica del bioreciclaje o bio-upcycling (Figura 4), es el procesamiento de una mezcla de diversos residuos plásticos que serán triturados mecánicamente para proceder con una despolimerización biológica mediante enzimas y microorganismos que pueden degradar los plásticos. Posteriormente, se realizará una separación de los productos despolimerizados para ser usados como materia prima para la fermentación microbiana en la que se pretende generar productos químicos de alto valor agregado como polihidroxialcanoato (PHA), ácido succínico y biosurfactantes, los cuales pueden tener diversas aplicaciones en la industria cosmética, farmacéutica y alimenticia, así como para la producción de bioplásticos.

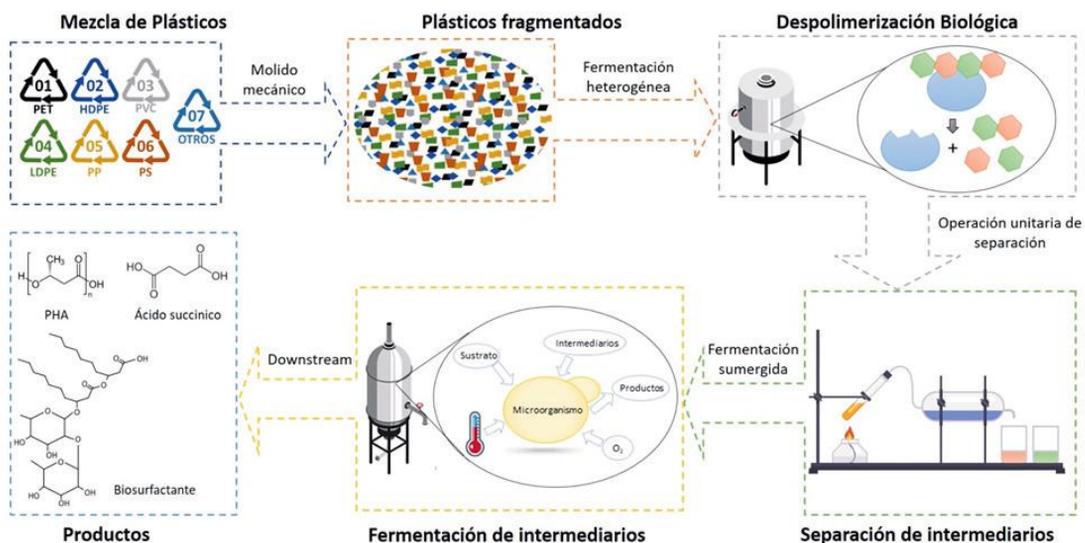


Figura 4. Concepción básica del bioreciclaje. Flujo del proceso desde la materia inicial, hasta la generación de subproductos de alto valor agregado (Basada en Ru *et al.*, 2020).



Para llevar

En la actualidad, se siguen realizando diversas investigaciones para el desarrollo de nuevas tecnologías como las aquí expuestas, las cuales presentan un elevado potencial para solucionar el inconveniente de la acumulación de los residuos plásticos. Aunque podría llegar a sustituir el reciclaje clásico, no resuelve el problema de la educación en la gestión de los residuos. A pesar de que se pueda tener la tecnología, será imposible generar cambios notables, si el depósito o destino de la basura no lo hacemos en los lugares adecuados. Con ello queremos enfatizar que además del desarrollo e implementación de nuevas tecnologías, se requieren urgentemente esfuerzos por difundir y educar acerca del impacto de los contaminantes plásticos, así como el cuidado del medio ambiente. 🍀

Conceptos

Biodegradación: degradación o descomposición de compuestos plásticos por ayuda de microorganismos, los cuales usan dichos plásticos como comida y energía.

Microplásticos: son todos aquellos residuos o pedazos menores de 5 mm de diámetro que resultan de la descomposición de objetos sintéticos.

Monómeros del plástico: parte principal por la que está formado un plástico y que se repite para formar el polímero.

Similitud de secuencia: se refiere al nivel de semejanza entre dos secuencias que suele expresarse en porcentaje.

Enzima: son compuestos orgánicos que desencadenan y facilitan las reacciones bioquímicas en los sistemas biológicos.

Peso molecular: es la totalidad de las masas atómicas de los átomos que conforman una molécula de un compuesto particular.

Cristalinidad: hace referencia al grado de orden estructural de un plástico, un plástico altamente cristalino estará muy ordenado provocando un cristal transparente.



Agradecimientos

Al proyecto de CONAHCYT FORDECYT-PRONACES/1727997/2020.



Para Consulta

-  Deng B, *et al.* 2023. Improving the activity and thermostability of PETase from *Ideonella sakaiensis* through modulating its post-translational glycan modification. *Commun Biol* 6(39). <https://doi.org/10.1038/s42003-023-04413-0>
-  Glaser AJ. 2019. Biological Degradation of Polymers in the Environment. In *Plastics in the Environment*: IntechOpen doi: <https://10.5772/intechopen.85124>.
-  Mican J, *et al.* 2023. Exploring New Galaxies: Perspectives on the Discovery of Novel PET-Degrading Enzymes. *Applied Catalysis B: Environmental* 123404.
-  Prata JC, *et al.* 2019. Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects. *Sci Total Environ* doi: <https://10.1016/j.scitotenv.2019.134455>.
-  Rahimi A, *et al.* 2017. Chemical recycling of waste plastics for new materials production. *Nature Reviews Chemistry*. doi: <https://10.1038/s41570-017-0046>.
-  Ru J, *et al.* 2020. Microbial Degradation and Valorization of Plastic Wastes. *Frontiers in Microbiology*. doi: <https://10.3389/fmicb.2020.00442>.
-  Sharma VP. 2020. *Polymers and Microplastics: Implications on Our Environment and Sustainability*. IntechOpen. doi: <https://10.5772/intechopen.89571>.
-  Yoshida S, *et al.* 2016. A bacterium that degrades and assimilates poly (ethylene terephthalate). *Science*. doi: <https://10.1126/science.aad6359>.



Crédito de imágenes en orden de aparición: Polina Tankilevith (Pexels, P), robuart, sparklestroke, Kriengsak Tarasri (Getty Images, GI), golubovy (GI), Eucalyp, piotr_malczyk (GI), Vlaskov Yurii, luisline, richcarey (GI), pcess609, MatyValey, PlutusART, Chaju Design, Collab Media (P), Visual Generation, Clker-Free-Vector-Images, nikonikon (Getty Images Signature, GIS), NotionPic, tmn, Nho Huy, UltimaSperanza, maryang, grebeshkov, Vector Juice, Stevica Mrdja/ EyeEm (GI), Giuseppe Ramos S, riksons (GI), MiguelMalo (GIS), cgdeaw (GI), Slamlabs. Crédito de figuras en orden de aparición: figura 2: Yoshida *et al.*, 2016, figura 3: Glaser, 2019, figura 4: Ru *et al.*, 2020.

Diseño de publicación: Yareli Fiburcio



Andrés Méndez Zamora

Estudiante del programa de Doctorado en Ciencias en Innovación Biotecnológica del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, con experiencia en fermentaciones, bioprocesos, bioinformática y biología molecular.

contacto: anmendez_al@ciatej.edu.mx



María Marcela Robles Machuca

Docente-investigador de tiempo completo Asociado B en la Universidad Autónoma de Nayarit. Actualmente, se ha enfocado en la producción microbiana de enzimas nativas y/o recombinantes para la degradación de plásticos. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores en su nivel Candidato y cuenta con perfil dentro del Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP). contacto: marcela.robles@uan.edu.mx



Alejandro Pereira Santana

Investigador por México comisionado al Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, sede sureste. Posee experiencia en el estudio evolutivo de genes y genomas en múltiples organismos, y manejo de datos ómicos de diversas plataformas. Su enfoque se centra en preguntas fundamentales sobre diversidad y el surgimiento de nuevos caracteres en hongos, plantas e insectos mediante el uso de herramientas de biología computacional. contacto: apereira@ciatej.mx



Leticia Casas Godoy

Investigadora por México comisionada a la Unidad de Biotecnología Industrial del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Posee una amplia experiencia en la búsqueda, modificación y diseño de enzimas degradadoras de plásticos, así como en la producción de lípidos microbianos, con un enfoque en la revalorización de residuos industriales para la generación de metabolitos de interés.

contacto: lcasas@ciatej.mx