

Polímeros microbianos y plásticos de base biológica

*Papá, ¿por qué ahora envuelves mis sándwiches con papel?
Antes siempre usabas plástico.*



Sonia Métrida, Gonzalo Durante-Rodríguez, M. Auxiliadora Prieto

Plataforma Interdisciplinar de Plásticos Sostenibles hacia una Economía Circular-CSIC (SusPlast-CSIC), Centro de Investigaciones Biológicas Margarita Salas, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CIB-CSIC), Madrid, España

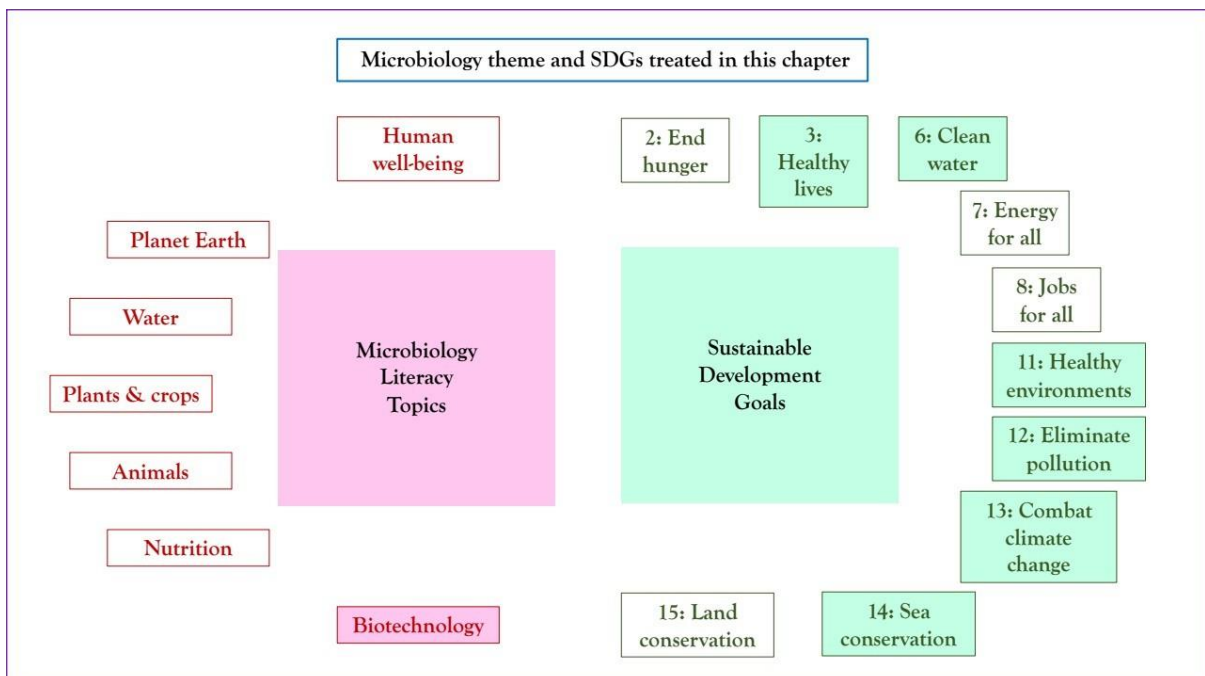
Polímeros microbianos y plásticos de base biológica

Sinopsis

Los plásticos se han convertido en una parte esencial de nuestras vidas. Su ductilidad y bajo costo ofrecen innumerables ventajas, como la posibilidad de producir componentes de automóviles ligeros pero resistentes, piezas de alta precisión para dispositivos médicos hospitalarios y envases que protegen los alimentos contra los patógenos. Sin embargo, a pesar de sus muchas ventajas, la producción y el uso masivo de plásticos están causando graves daños al medio ambiente, contaminando los océanos y su vida silvestre y, en última instancia, dañando la salud de las personas. Este impacto podría reducirse cambiando nuestro sistema de producción y consumo para hacer un uso eficiente de los recursos disponibles y desarrollar nuevos materiales respetuosos con el medio ambiente. El uso excesivo de plásticos representa una amenaza para el medio ambiente y la salud humana. Las soluciones a estos desafíos forman parte integral de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas.

Los plásticos y el contexto social

Los plásticos: vertederos e islas de plástico en los océanos; contaminación del agua dulce y del suelo; presencia de metales tóxicos; causa de muerte de animales; acumulación de microplásticos en los tejidos y problemas de salud; fuentes no renovables; fuentes no degradables; emisiones de gases de efecto invernadero. *Para completar el marco*: impacto ambiental y económico; falta de políticas y acciones sociales.



A child-centric microbiology education framework

Polímeros microbianos y plásticos de base biológica

1. Los envases utilizados para conservar los sándwiches ilustran el uso extensivo de plásticos en la vida cotidiana. Muchos objetos que se utilizan a diario en los hogares, como juguetes, peines y cepillos de dientes, están hechos de plástico. Un vistazo a un automóvil revelará que muchas de sus partes son de plástico, y los materiales de un solo uso que se encuentran en los hospitales, incluidos guantes y jeringas, también son de plástico. Lo mismo ocurre con la comida. Los plásticos se utilizan como protección contra las bacterias, aumentando la vida útil de productos como la carne y el pescado. Si comparamos la vida de nuestros abuelos con la nuestra, nos damos cuenta de que la suya era menos sofisticada. Sus juguetes estaban hechos de madera en lugar de plástico, compraban sus alimentos en mercados donde se vendían sin empaquetar. Y no todo el mundo tenía auto. El estilo de vida consumista de hoy significa que, en general, las personas ahora tienen muchas más cosas que en el pasado. Incluso la ropa es diferente. Mientras que nuestros abuelos usaban lana y algodón, gran parte de lo que vestimos está hecho con materiales sintéticos a base de plástico. El uso del plástico está generalizado porque es barato, duradero, impermeable y flexible, entre otras propiedades sobresalientes. Los plásticos nos han aportado muchos beneficios y nos han facilitado la vida, pero su producción y aplicaciones han aumentado exponencialmente en los últimos cincuenta años. En 2018 se produjeron 360 millones de toneladas de plástico en todo el mundo, mientras que en 1990 solo se produjeron 100 millones de toneladas.



Figura 1. Objetos cotidianos hechos de plástico.

2. A pesar de todos sus beneficios, los plásticos se han convertido en un serio desafío para nuestra salud y nuestro planeta. Sólo se recicla una botella de plástico de cada diez que se desechan. Muchos de ellos terminan en nuestras playas y océanos, formando enormes islas de plástico flotantes. Ya se ha demostrado que la omnipresencia del plástico en el medio ambiente, que se debe principalmente a su notable **durabilidad**, tiene un impacto perjudicial en los ecosistemas. Se estima que los plásticos a base de petróleo, como los que se usan en botellas y algunas prendas de vestir, tienen un tiempo de descomposición natural que dura cientos o incluso miles de años. En este lento proceso de degradación, un trozo de plástico o

A child-centric microbiology education framework

fibra textil se fragmenta gradualmente por la acción mecánica del agua, el viento y los microbios, en partículas cada vez más pequeñas, formando finalmente **microplásticos**. Estos plásticos y microplásticos terminan siendo consumidos por animales, lo que a menudo causa su muerte. A veces, estas micropartículas **se bioacumulan** en los tejidos corporales de estos animales, que luego son consumidos por las personas, lo que eventualmente conduce a graves problemas de salud¹. Además de las micropartículas, la degradación de los plásticos produce químicos y sustancias tóxicas utilizadas como aditivos que se liberan en el suelo y los mares, contaminando así estos ecosistemas. ¿Qué acciones se están llevando a cabo para mejorar la gestión de los plásticos? ¿Se puede disminuir la producción de plástico?

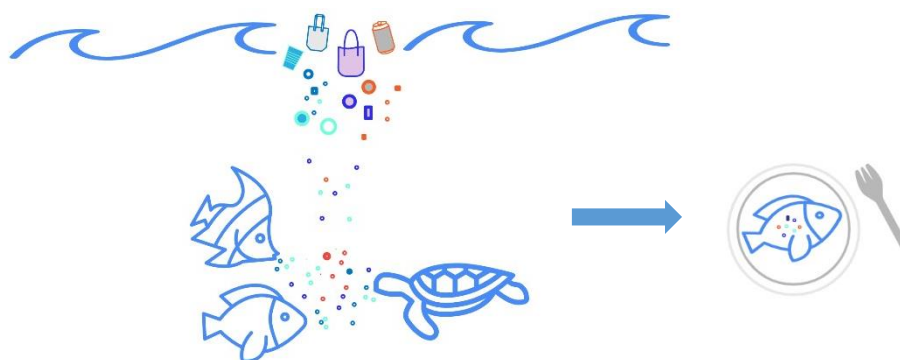


Figura 2. Contaminación por microplásticos en los océanos. Los desechos plásticos se descomponen en partículas más pequeñas, que son absorbidas por los animales marinos y acumuladas en sus tejidos. La ingestión de estos animales puede afectar a la salud humana.

3. **Nuestro sistema de producción es lineal: producir, usar, tirar.** Este sistema conduce a la generación de grandes cantidades de residuos acumulados, incluidos los plásticos, y al agotamiento de nuestras materias primas (petróleo, madera), que no son para nada ilimitadas. La **economía circular** es una forma de reducir los residuos y proteger las materias primas. Este enfoque transformará nuestro actual sistema productivo lineal en un sistema circular, donde la gestión de residuos se basa en el concepto de las **3 R: reutilizar, reducir, reciclar**. Este concepto gira en torno a tres acciones clave: **reutilizar** objetos que ya han sido utilizados anteriormente, lo que alarga su vida útil y reducirá el hábito de depender de productos de un solo uso; **reducir** el consumo mediante el cambio de hábitos de vida, lo que disminuye la cantidad de residuos generados; y **reciclar** esos residuos utilizándolos como materia prima para la producción, convirtiendo así nuestro sistema lineal actual en un sistema circular.

Solo el 31% del plástico producido en Europa se recicla actualmente, el 27% se vierte en vertederos y el 42% se quema en plantas de incineración. Así que: por cada 100 botellas que se tiran en Europa, 27 se tiran a los vertederos, 42 se queman y solo 31 se reciclan. Reciclar significa procesar los residuos para transformarlos en nuevos materiales, de modo que no se necesiten materias primas frescas. El enfoque de las 3 R puede ampliarse con **otras 3 R:**

- **Rediseño:** las ideas innovadoras y creativas tienen el poder de transformar los residuos en oportunidades y productos de alto valor añadido.
- **Reparación:** deberíamos ser capaces de reparar los productos que no funcionan en lugar de simplemente tirarlos.
- **Recuperar:** recolectar materiales usados en lugar de liberarlos al medio ambiente, para que

A child-centric microbiology education framework

puedan procesarse adecuadamente para su reciclaje.

En este concepto extendido de las **6 R** que resulta de la combinación de las acciones anteriores, se fortalece cada una de las etapas de la economía circular.

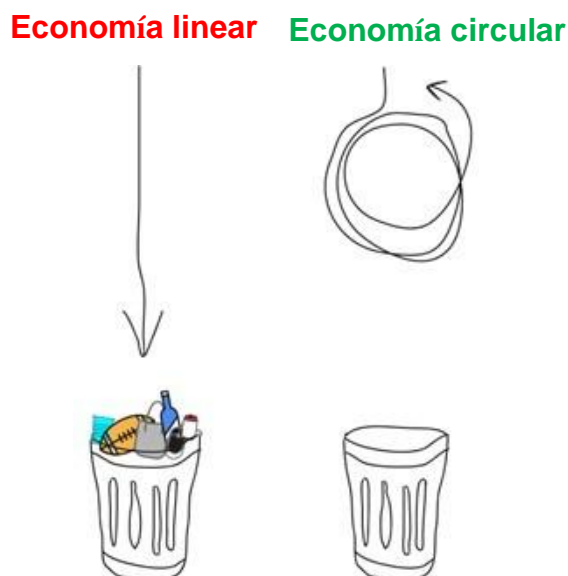


Figura 3. Comparación entre las cadenas productivas de la economía lineal y la economía circular.

Un sistema de economía circular para la transformación y el uso de residuos puede reducir la cantidad de nuevos residuos liberados al medio ambiente. **Sin embargo, ¿qué pasa con el plástico que ya está en los océanos, en las playas y en los vertederos?** El plástico tarda mucho tiempo en descomponerse de forma natural. Si fuéramos capaces de recolectarlo, su degradación podría acelerarse mediante la quema o el uso de procesos químicos o la domesticación de microorganismos para degradarlo. **La incineración** de residuos plásticos se utiliza ampliamente en algunos países, como Suiza, Austria y Finlandia. La combustión recupera parte de la energía presente en los plásticos, la cual se aprovecha para calentar los hogares en invierno. Sin embargo, además de energía, al quemar los plásticos también se liberan a la atmósfera CO, CO₂ y metales nocivos para el medio ambiente. Para evitar un aumento de los gases de efecto invernadero, estos gases tendrían que ser recuperados y reutilizados. En el campo de la biotecnología se ha propuesto una opción más ecológica y menos perjudicial para el medio ambiente, que prevé el uso de microorganismos para degradar los residuos plásticos.

4. ¿Cómo pueden los microbiólogos y biotecnólogos ayudar a reducir el impacto que los plásticos tienen en el medio ambiente? Las bacterias son los organismos más abundantes del planeta. Se encuentran en todo tipo de hábitats: en la fruta, el suelo, el tracto digestivo de animales, las profundidades marinas, aguas termales, hielo e incluso en desechos radiactivos. Su éxito evolutivo se debe en parte a un metabolismo versátil y robusto. Algunas bacterias son capaces de obtener el carbono que necesitan del CO₂, mientras que otras lo encuentran en la materia orgánica. La luz es la fuente de energía para algunas, y otras la obtienen oxidando un compuesto químico o un gas, como el hidrógeno.

Los microbiólogos estudian la diversidad de los microorganismos, su comportamiento, crecimiento, metabolismo y cómo se pueden utilizar en los procesos industriales, convirtiéndolos en "microfábricas" para la producción. Muchos productos alimenticios, como el pan, el queso y la cerveza, se elaboran de esta manera desde hace miles

A child-centric microbiology education framework

de años, antes de que se conociera la existencia de los microorganismos. Fue el microbiólogo francés Louis Pasteur quien descubrió que los microorganismos eran responsables de los procesos de fermentación que tienen lugar durante la producción de estos productos alimenticios. Hoy en día, los procesos en los que los microorganismos tienen un papel en la fabricación de productos que son beneficiosos para los humanos, se estudian y desarrollan en **biotecnología microbiana**. Los biotecnólogos despliegan su experiencia para obtener compuestos valiosos, como vacunas, insulina y antibióticos, a partir de microorganismos utilizando medios genéticos y bioquímicos. Gracias a la versatilidad de los microorganismos, la biotecnología se utiliza en la industria alimentaria y en la medicina. Más recientemente, se ha comenzado a aplicar en el tratamiento de aguas residuales, residuos tóxicos e incluso residuos urbanos.

Esencialmente, hay dos formas en que la biotecnología microbiana puede contribuir a superar el impacto de los plásticos en el medio ambiente. Una de ellas podría ser descomponiendo los plásticos derivados del petróleo, contribuyendo al reciclaje y/o reduciendo su persistencia en el entorno abierto. La segunda opción es generar nuevos materiales respetuosos con el medio ambiente, adecuados para su uso en algunas de las aplicaciones más contaminantes de los plásticos convencionales, como el envasado de alimentos.

5. Si tomáramos un pedazo de plástico a la deriva del océano y lo observáramos a través de un microscopio, veríamos millones de bacterias viviendo en su superficie. Los fragmentos de plástico liberados en los océanos durante cientos de años son colonizados por organismos microscópicos, formando comunidades microbianas que incluyen bacterias, levaduras y diatomeas. Estos desechos plásticos y microplásticos se han convertido en un nuevo ecosistema dentro de nuestros océanos, llamado la **plastisfera** (Fig. 4). Las comunidades microbianas colonizan la plastisfera, utilizando su versatilidad metabólica para adaptarse. Algunas bacterias son capaces de obtener micronutrientes, como el hierro y el cobalto, así como energía, a partir de los metales que se encuentran en la superficie de los fragmentos de plástico. Ciertas bacterias tienen **enzimas** capaces de alterar los plásticos, incluido el tereftalato de polietileno (PET), que es el material del que están hechas la mayoría de las botellas de agua. El PET es un polímero resistente y difícil de degradar. Las bacterias crecen alrededor de los microplásticos formando **biopelículas** y secretan **enzimas extracelulares** a través de su pared celular hacia el medio ambiente.



A child-centric microbiology education framework

Figura 4. Ilustración que imita una comunidad microbiana que forma biopelículas en la superficie de la basura plástica marina como un ecosistema en miniatura que incluye muchos tipos de microorganismos. Las enzimas extracelulares secretadas por los miembros de las comunidades están representadas en colores púrpura y amarillo.

Una visión muy simplificada de esta estrategia puede considerar que estas enzimas extracelulares podrían actuar de forma muy parecida a las tijeras, como si estuvieran descomponiendo un juguete de Lego (es decir, el polímero plástico) en sus constituyentes elementales (es decir, los monómeros). Utilizan las piezas más simples de Lego (es decir, monómeros) para construir nuevos juguetes (es decir, estructuras bacterianas o nuevos bioproductos mejorados) (Fig. 5). El problema es que estas enzimas no son naturalmente eficientes en el entorno abierto y no contribuyen significativamente a la degradación del plástico en la naturaleza.

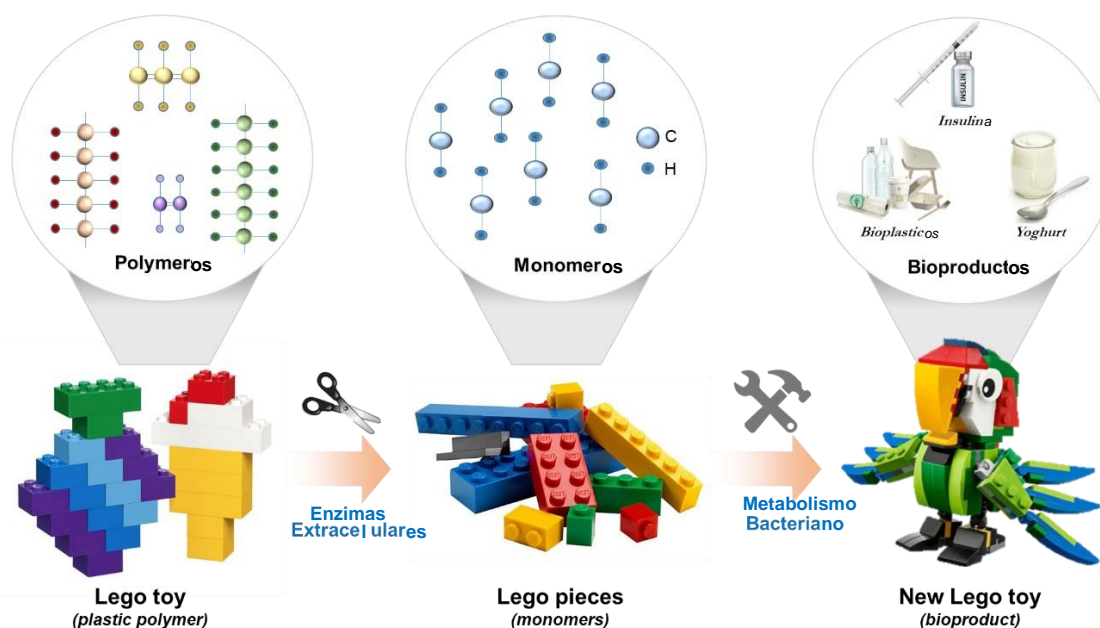


Figura 5. Esquema para la transformación ideal de polímeros plásticos basado en una analogía de Lego. Estructura básica de polímero y monómero. C y H representan átomos de carbono e hidrógeno.

Estas enzimas son particularmente interesantes para la industria, ya que pueden diseñarse para domesticar microorganismos y llevar a cabo la degradación del plástico en sistemas confinados después de la clasificación. La misión de los biotecnólogos es mejorar estas enzimas, aumentando la producción y mejorando su poder degradante y su eficacia, para que puedan ser utilizadas en los procesos de reciclaje. Para lograrlo, utilizan instrumentos de biología sintética para modificar genéticamente las bacterias encargadas de expresar y producir estas enzimas. Esto les permite mejorar el rendimiento de enzimas individuales, aumentando su velocidad de degradación, aumentando su secreción extracelular o cambiando su especificidad para reconocer un nuevo polímero objetivo.

La biotecnología y la biología sintética también abren una gama de nuevas posibilidades. ¿Sería posible desarrollar un nuevo material que sustituya a algunos plásticos?

6. Los plásticos derivados del petróleo podrían ser reemplazados parcialmente por materiales similares que no sean tan dañinos para el medio ambiente. Actualmente se están desarrollando y comenzando a utilizar nuevos materiales basados en materias primas

A child-centric microbiology education framework

renovables, llamados **plásticos de base biológica (BBP)**. Para que estos materiales sustituyan a los plásticos tradicionales en algunas aplicaciones, como el envasado de alimentos, deben tener propiedades similares. Hay muchos tipos diferentes de plásticos tradicionales hechos de petróleo, que es una fuente no renovable. Los rasgos clave que todos comparten son una alta capacidad para deformarse sin romperse, resistencia a la humectación y bajo costo de producción. Para sustituir los plásticos estándar por materiales alternativos, estos deben ofrecer las mismas propiedades y también ser amigables con el medio ambiente.

Los BBP se producen a partir de fuentes renovables, como residuos vegetales, residuos industriales o residuos urbanos, y pueden ser **biodegradables (y/o compostables)** o **no biodegradables**:

- Los BBP no biodegradables pueden ser químicamente idénticos a los plásticos petroquímicos, al igual que el **polietileno** (bio-PE) y el **tereftalato de polietileno** (bio-PET), pero el hecho de que al menos uno de sus componentes esté fabricado a partir de materia orgánica derivada de recursos renovables hace que su producción sea independiente de sistemas insostenibles. Su síntesis implica la modificación química del bioetanol producido por procesos biotecnológicos. Sin embargo, a pesar de todas sus excelentes propiedades, los BBP no biodegradables siguen representando un desafío para el medio ambiente, ya que necesitan tratamientos de reciclaje similares a los de sus homólogos a base de petróleo.
- Los BBPs biodegradables/compostables, por otro lado, son degradados eficientemente por microorganismos cuando se cultivan bajo condiciones controladas de luz, humedad y temperatura en plantas de reciclaje o compostaje (BBP compostables). Algunos de ellos también se biodegradan en algunos sitios de ambiente abierto (BBP biodegradables), pero depende de las condiciones abióticas y la diversidad microbiana del lugar en particular. Los BBP compostables más utilizados en la actualidad están hechos de almidón de patata o cereal y **ácido poliláctico (PLA)**. El PLA se sintetiza en dos etapas: primero, el ácido láctico se genera por fermentación bacteriana a partir de desechos de maíz o remolacha, y luego el PLA se sintetiza químicamente a partir de ácido láctico mediante una reacción convencional utilizada por los químicos de polímeros llamada polimerización de apertura de anillo. Las bolsas de plástico están siendo reemplazadas en grandes cantidades por bolsas hechas con almidón de papa, y el PLA está reemplazando los plásticos tradicionales utilizados en el envasado de alimentos.

Existen otras estrategias biotecnológicas que consisten en utilizar otros biopolímeros microbianos como la **celulosa bacteriana** o el **polihidroxialcanoato (PHA)** para generar BBPs. El PHA ha sido el material de mayor crecimiento en el mercado en los últimos años, aunque todavía es difícil encontrar productos fabricados con este polímero. El PHA es un BBP producido directamente por muchas bacterias. Es el único material plástico que es completamente generado por un organismo vivo. Estas bacterias son capaces de alimentarse de los desechos y transformarlos en inclusiones de grasa intracelular llamadas gránulos de PHA, que se almacenan dentro de su citoplasma como reserva de carbono y energía, de manera similar a la forma en que los seres humanos acumulan reservas de grasa. Esto permite producir PHA a partir de aguas residuales obtenidas en plantas de tratamiento, de residuos urbanos e incluso de corrientes de gas (por ejemplo, CO₂ y/o CO) generadas en procesos termoquímicos, como la gasificación y la pirólisis. Las propiedades del PHA resultante variarán en función del sustrato sobre el que se alimenten las bacterias productivas, por lo que los biotecnólogos eligen un medio de cultivo adecuado en el que cultivar las bacterias y lo combinan con las modificaciones genéticas pertinentes para obtener la BBP específica que buscan.

Por último, pero no menos importante, el hecho de sustituir los plásticos convencionales por BBPs no implica que el concepto de las **6 R** deje de ser válido. Si nuestro

A child-centric microbiology education framework

objetivo es la utilización de BBP en nuestra vida diaria, requerirá sistemas adecuados de fabricación y gestión de residuos. Solo para hacerlo mejor esta vez.

La sustitución de los plásticos tradicionales por BBP alternativos y renovables aún está muy lejos, pero ha habido un claro cambio en términos de fabricación y aplicaciones hacia estos materiales. Las propiedades que ofrecen estos materiales, ya sea individualmente o combinados, están a la par con las de los plásticos modernos.

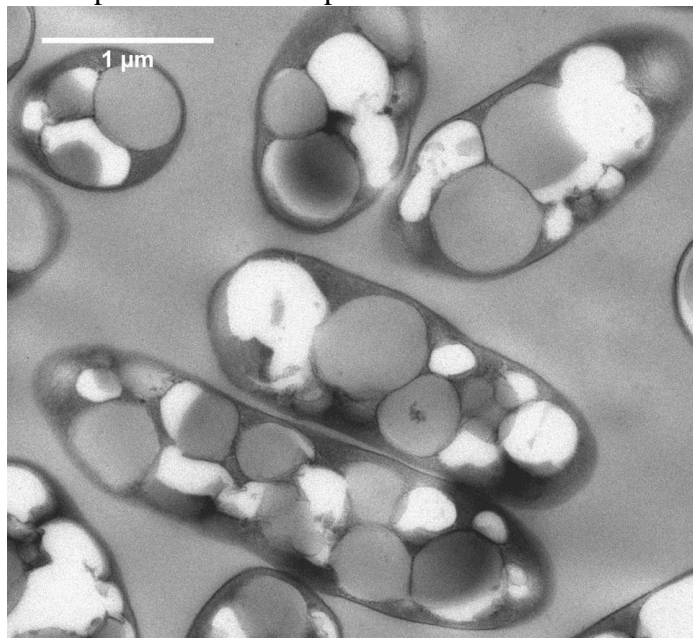


Figura 6. Micrografía electrónica de bacterias productoras de PHA. Los gránulos dentro de las células están compuestos principalmente de polímeros PHA.

Relevancia para los Objetivos de Desarrollo Sostenible y los grandes desafíos

La problemática de la contaminación plástica y los bioplásticos relacionados con varios ODS.

- **Objetivo 3. Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades** (*mejorar la salud; reducir las enfermedades prevenibles y las muertes prematuras*). El ciclo de vida de los plásticos genera cantidades masivas de residuos, que a menudo se liberan al aire y el agua en el medio ambiente. Estos microplásticos y compuestos químicos tóxicos son inhalados o ingeridos indirectamente por los seres humanos, afectando gravemente su salud. Estos plásticos podrían ser sustituidos por nuevos materiales biocompatibles, biodegradables y no dependientes del petróleo, como los plásticos microbianos, que son más respetuosos con el medio ambiente y, por tanto, potencialmente menos perjudiciales para la salud de las personas.

- **Objetivo 6. Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos** (*garantizar el agua potable, mejorar la calidad del agua, reducir la contaminación, proteger los ecosistemas relacionados con el agua y mejorar la gestión del agua y el saneamiento*). La mayoría de los plásticos petroquímicos tienen aditivos químicos y metales en su superficie. A medida que estos plásticos se degradan en los océanos y ríos, liberan contaminantes que son tóxicos para la salud humana. Estos contaminantes terminan en los animales marinos que comen las personas y en las fuentes de agua subterránea, lo que perjudica la calidad del agua potable.

A child-centric microbiology education framework

- **Objetivo 11. Ciudades y comunidades sostenibles** (*lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles*). El reciclaje y la gestión adecuada de los residuos plásticos, junto con una estrategia basada en la sustitución del plástico petroquímico por plástico de base biológica, conducirá a una mejor conservación del medio ambiente y a la recuperación de hábitats que ya se han visto comprometidos por este tipo de residuos. Estas mejoras darán como resultado entornos más saludables.

- **Objetivo 12. Garantizar patrones de consumo y producción sostenibles** (*lograr prácticas de producción y uso/consumos sostenibles, reducir la producción de residuos/liberación de contaminantes al medio ambiente, lograr ciclos de vida de cero residuos e informar a las personas sobre las prácticas de desarrollo sostenible*). La producción y el consumo actual de plásticos es insostenible y tiene un impacto extremadamente alto en los ecosistemas. Se producen enormes cantidades de plástico que no se pueden gestionar adecuadamente solo con el reciclaje. Tenemos que trabajar por una producción y un consumo sostenibles y responsables. Necesitamos reemplazar los materiales de un solo uso en la medida de lo posible por materiales diseñados biotecnológicamente que sean biocompatibles, duraderos, reciclables y obtenidos a partir de materias primas baratas, incluidos los residuos.

- **Objetivo 13. Tomar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus impactos** (*reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, mitigar las consecuencias del calentamiento global, desarrollar sistemas de alerta temprana para las consecuencias del calentamiento global y mejorar la educación sobre la producción de gases de efecto invernadero y el calentamiento global*). La producción e incineración de plásticos libera gases como CO₂, CO, H₂, CH₄ y N₂O. A lo largo de su ciclo de vida, los plásticos contribuyen al aumento de los gases de efecto invernadero que entran en la atmósfera. Este impacto ambiental podría reducirse fomentando el reciclaje y la reutilización de materiales, ya que así se evitaría la incineración como método de gestión de residuos y se reduciría el vertido de plásticos en playas y vertederos. Además, la biotecnología permite generar microorganismos que son capaces de utilizar estos gases de efecto invernadero como "alimento" para las bacterias, que a su vez pueden producir plásticos de base biológica. Con ello se logran dos objetivos: (i) no se liberan gases de efecto invernadero por la incineración de residuos, y (ii) se producen BBP para sustituir gradualmente a los plásticos petroquímicos.

- **Objetivo 14. Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible** (*reducir la contaminación de los sistemas marinos por productos químicos tóxicos/nutrientes/desechos agrícolas como los plásticos, desarrollar medidas de mitigación para la acidificación, y mejorar el uso sostenible de los océanos y sus recursos*). Entre ocho y doce millones de toneladas de plástico, como botellas y bolsas, acaban en nuestros océanos cada año debido a una mala gestión de los residuos. Estos plásticos son directamente responsables de la muerte de muchos animales marinos y aves. Los aditivos químicos y los metales pesados contenidos en estos plásticos son tóxicos para los ecosistemas marinos. Controlar la fuente de generación de residuos plásticos e invertir en educación ambiental podría reducir la contaminación de los océanos.

Posibles implicaciones para las decisiones

1. Individual

- a. ¿Deberíamos usar BBP o plásticos de origen petroquímico? ¿Su menor

A child-centric microbiology education framework

impacto ambiental compensa su mayor coste y la necesidad de adaptar los procesos de reciclaje/compostaje a estos nuevos productos?

- b. ¿Hay que seguir utilizando plásticos de un solo uso o es preferible utilizar plásticos reutilizables? ¿Los beneficios medioambientales de reducir la producción de plásticos de un solo uso superan los beneficios para la salud y la higiene que proporcionan? ¿Podría depender del entorno en el que se utilicen dichos plásticos?
- c. ¿Es mejor comprar alimentos en envases de plástico o a granel? Eliminar los envases reduce los residuos plásticos y disminuye la huella de carbono. ¿Estos beneficios superan la seguridad alimentaria y la vida útil más larga?

2. Políticas comunitarias

- a. Implementar programas de educación y sensibilización.
- b. Proporcionar y gestionar contenedores adecuados para el reciclaje y el compostaje.
- c. Elaborar literatura descriptiva y explicativa sobre los diferentes tipos de BBPs, centrándose en sus características individuales, compostabilidad y reciclabilidad.

3. Políticas nacionales relativas a los BBP

- a. Gestión de BBP: ¿Se puede seguir utilizando la misma cadena de reciclaje o es necesario abrir nuevas líneas para la gestión de BBP? Establecer el costo de estas estrategias.
- b. Etiquetado específico por tipo de plástico o BBP.
- c. Etiquetado de envases y empaques para una correcta recolección y gestión de residuos.
- d. Alinear las normativas y procedimientos de gestión de residuos en diferentes países y regiones.
- e. ¿Deben utilizarse las tierras agrícolas para producir BBP o su producción debe seguir basándose en la valorización de residuos?
- f. Aplicación de impuestos a las empresas que producen plásticos no ecológicos.
- g. Regulación de los costes de producción y comercialización de los productos basados en BBP.
- h. Determinar el impacto ambiental de los BBP desde el principio hasta el final de su vida útil.
- i. Evaluación e informe sobre el impacto ambiental de los BBP y la contaminación por microplásticos en ríos y océanos.
- j. Producción de gases de efecto invernadero en los procesos de gestión de residuos plásticos.
- k. Control de aditivos y metales tóxicos en la producción de BBPs.

Participación de los alumnos

1. Discusión en clase de los problemas asociados con los plásticos

- a. Impacto de los plásticos en los océanos.
- b. Impacto de los plásticos en la salud humana.
- c. Discusión en clase de los BBP como material alternativo.

A child-centric microbiology education framework

2. Concientización de los alumnos

- a. Plásticos: consecuencias positivas y negativas para los ODS. ¿Cuáles de estos son los más importantes para ustedes personalmente?
- b. Los BBP tienen consecuencias positivas y negativas para los ODS. ¿Cuáles de estos son los más importantes para ustedes personalmente?
- c. ¿Se les ocurre algo que se podría hacer para reducir las consecuencias negativas de los plásticos, especialmente en la industria alimentaria y de empaques?
- d. ¿Se les ocurre algo que podrían hacer personalmente para reducir la huella ambiental de los plásticos?

3. Ejercicios

- a. En la mayoría de las ciudades, la gestión de los residuos plásticos/BBP se ignora o se maneja como basura normal. ¿Qué otras alternativas a la eliminación de residuos plásticos se imaginan?
- b. Los materiales plásticos se producen en grandes instalaciones, a menudo relacionadas a operaciones de procesamiento de alimentos, construcción y automóviles. ¿Qué opciones sostenibles existen para los coches, los edificios y los envases? ¿Cómo podrían formular un auto, un alimento, y producirlo sostenible para su ciudad/pueblo/región?
- c. En cuanto a los ODS, ¿cómo podemos cambiar nuestro enfoque hacia las empresas de plástico para llevarlas a una vida sostenible? ¿Cuáles son los desafíos y oportunidades?
- d. Crear un plan de ciudad sostenible para la producción de plástico y sus impactos ambientales asociados.

4. Experimentos de clase

- a. Los estudiantes de la clase recogen diferentes tipos de BBP y los colocan en diferentes entornos durante semanas o meses (por ejemplo, los entierran en el patio de la escuela). Cada semana toman muestras y observan la degradación de los diferentes tipos de BBP.
- b. Compara diferentes tipos de BBP. Trata de distinguir entre una botella de PLA y una botella de PET sin ningún conocimiento previo de lo que está hecha cada una.
- c. ¿Qué tipo de material les gustaría tener? ¿Cómo sería? Describan las propiedades que tendría y con qué otros materiales lo harían.

La base empírica, la lectura complementaria y los medios didácticos

Amaral-Zettler LA *et al.* Ecology of the plastisphere. *Nat Rev Microbiol.* (2020).

Narancic *et al.* Biodegradable Plastic Blends Create New Possibilities for End-of-Life Management of Plastics but They Are Not a Panacea for Plastic Pollution. *Environ. Sci. Technol.* (2018) 52, 10441–10452. DOI: 10.1021/acs.est.8b02963

Stephanie L. Wright and Frank J. Kelly. Plastic and Human Health: A Micro Issue? *Environmental Science & Technology* (2017) 51 (12), 6634-6647.

[https://www.eea.europa.eu/airs/2018/resource-efficiency-and-low-carbon-economy/greenhouse-gas-emissions\)](https://www.eea.europa.eu/airs/2018/resource-efficiency-and-low-carbon-economy/greenhouse-gas-emissions)

https://ec.europa.eu/environment/efe/news/ambitious-new-strategy-make-plastic-fantastic-2018-03-16_es

A child-centric microbiology education framework

Bio-based Building Blocks and Polymers – Global Capacities, Production and Trends 2019-2024

<https://www.nationalgeographic.com/environment/2018/11/are-bioplastics-made-from-plants-better-for-environment-ocean-plastic/>

<https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/polyhydroxyalkanoate>

Crippa M, De Wilde B, Koopmans R, Leyssens J, Muncke J, Ritschkoff AC, Van Doorselaer K, Velis C & Wagner MA. Circular economy for plastics – Insights from research and innovation to inform policy and funding decisions. (2019) (M De Smet & M Linder, Eds.). European Commission, Brussels, Belgium.

<https://www.ciel.org/wp-content/uploads/2019/02/Plastic-and-Health-The-Hidden-Costs-of-a-Plastic-Planet-February-2019.pdf>

Glosario

- **Aditivos:** Compuestos y sustancias orgánicas e inorgánicas mezclados en o aplicados a la superficie de los plásticos para otorgar las propiedades materiales deseadas al plástico. Por ejemplo, antioxidantes, aglutinantes, colorantes, retardantes de llama, plastificantes, refuerzos, estabilizantes, etc.
- **Bioacumulación:** Acumulación gradual de un compuesto orgánico, como pesticidas, en un organismo. La bioacumulación ocurre cuando un organismo absorbe un compuesto a una velocidad mayor que la que el compuesto se pierde del organismo.
- **Plástico de base biológica:** Plástico que contiene carbono orgánico de origen renovable procedente de fuentes vegetales, animales o microbianas.
- **Plástico biodegradable:** Un plástico que sufre una biodegradación que implica la utilización metabólica del carbono plástico por parte de microorganismos como bacterias, hongos y algas, lo que resulta en la conversión de carbono plástico en CO₂ (y CH₄) y biomasa microbiana.
- **Bioplástico(s):** Término genérico que engloba tanto los materiales plásticos compuestos por polímeros biodegradables como los materiales plásticos compuestos por polímeros de base biológica.
- **Biopolímero:** Polímero producido por un organismo vivo.
- **Enzima:** Proteína producida por un organismo vivo que ayuda a que ocurra un cambio químico o que ocurra más rápidamente, sin ser modificada por sí misma.
- **Microplástico:** Piezas extremadamente pequeñas de plástico en el medio ambiente que provienen de productos de consumo y desechos industriales.
- **Plastisfera:** Fina capa de vida microbiana que rodea al plástico en ambientes acuáticos. Ocurre en cada uno de los billones de pequeñas piezas de plástico en el océano. Este ecosistema en miniatura incluye productores primarios que utilizan la luz solar y productos químicos inorgánicos para crecer, herbívoros que se alimentan de estos "campos" de productores primarios, depredadores que matan y comen otras células, parásitos, simbioses que viven junto con sus huéspedes y degradadores que reciclan biomasa y productos químicos para su reutilización en el sistema.
- **Polihidroxicanoato (PHA):** Los PHA son biopolímeros biodegradables y plásticos de base biológica, sintetizados por muchas bacterias como producto intracelular a través de procesos de fermentación microbiana.
- **Ácido poliláctico (PLA):** El PLA es un poliéster compostable industrial y de base biológica. Está formado por ácido L y/o D-láctico que se producen a través de la fermentación microbiana y se polimerizan químicamente para producir PLA.
- **Jerarquía de residuos:** Representa el enfoque de la Unión Europea en materia de

A child-centric microbiology education framework

gestión de residuos. Su objetivo es adoptar una jerarquía de residuos, que establece el siguiente orden de prioridad a la hora de dar forma a la política de residuos y de la gestión de los residuos a nivel operativo: prevención, (preparación para) la reutilización, el reciclado, la valorización y, como opción menos preferida, la eliminación (que incluye el depósito en vertederos y la incineración sin recuperación de energía).

¹ <https://www.sapea.info/topics/microplastics/>

² Esta particular vista de la plastisfera fue diseñada por Rafael del Villar, estudiante del Grado de Bioquímica en la UAM, España- El dibujo de la basura plástica ha sido adaptado a partir de una imagen de Freepik.com (vector de Ola, creado por upklyak, <https://n9.cl/c7m7l>)