

# EL FUTURO NOS ALCANZA, LA META: LA TRANSICIÓN DE LOS POLÍMEROS SINTÉTICOS A LOS BIODEGRADABLES PARA UN FUTURO SOSTENIBLE

*THE FUTURE CATCHES UP WITH US, AND THE GOAL: THE TRANSITION FROM SYNTHETIC TO BIODEGRADABLE POLYMERS FOR A SUSTAINABLE FUTURE*

AMILCAR GÓMEZ ALONZO  
MARTÍNEZ <sup>1</sup>,

LORENA FARÍAS CEPEDA <sup>1</sup>

ROSA I. NARRO CÉSPEDES <sup>1</sup>

FRANCISCO J. ENRÍQUEZ  
MEDRANO <sup>2</sup>

1. Facultad de Ciencias  
Químicas, Unidad Sureste,  
UAdeC.

2. Centro de Investigación  
en Química Aplicada,  
Saltillo, Coah.

Correspondencia  
lorenafarias@uadec.edu.mx

Recepción de artículo  
4 de marzo de 2024.

Artículo aceptado  
16 octubre de 2024.

## RESUMEN

Los polímeros sintéticos son esenciales en diversas actividades cotidianas debido a su durabilidad, resistencia a la degradación y bajo costo. No obstante, estas mismas propiedades han contribuido a un problema creciente de contaminación ambiental, especialmente cuando se trata de plásticos de un solo uso que persisten en el entorno durante largos períodos, afectando tanto los ecosistemas como la salud humana. Por otro lado, los polímeros biodegradables son macromoléculas que se descomponen fácilmente mediante la acción de agentes biológicos (enzimas, bacterias y microorganismos). Sin embargo, los polímeros biodegradables presentan propiedades mecánicas y de resistencia química mucho menores que sus contrapartes sintéticas. La ciencia de los materiales actualmente está enfocando sus esfuerzos en lograr que los polímeros biodegradables mejoren sus propiedades mecánicas, ya sea mezclándolos con otros polímeros o materiales pero que sigan conservando su biodegradabilidad. Por ello, en este artículo se proporciona una visión general sobre los problemas actuales que enfrentan los materiales en el camino hacia un futuro sostenible, y se presenta un panorama general de los polímeros biodegradables, desde su clasificación hasta sus principales usos en biomedicina y aplicaciones industriales en general.

**Palabras clave:** polímeros biodegradables; biopolímeros; aplicaciones de biopolímeros.

## ABSTRACT

*Synthetic polymers are essential in various everyday activities due to their durability, resistance to degradation, and low cost. However, these same properties have contributed to a growing environmental pollution problem, especially with single-use plastics that persist in the environment for extended periods, affecting both ecosystems and human health. On the other hand, biodegradable polymers are macromolecules that easily break down through the action of biological agents (enzymes, bacteria, and microorganisms). Nevertheless, biodegradable polymers have much lower mechanical and chemical resistance properties compared to their synthetic counterparts. Material science is currently focusing its efforts on improving the mechanical properties of biodegradable polymers, either by blending them with other polymers or materials, while still maintaining their biodegradability. Therefore, this article provides an overview of the current challenges materials face on the path toward a sustainable future and presents a general outlook on biodegradable polymers, from their classification to their main uses in biomedicine and general industrial applications.*

**Keywords:** *biodegradable polymers; biopolymers; biopolymers applications.*

## INTRODUCCIÓN

La producción de los plásticos a nivel mundial ha aumentado drásticamente desde su descubrimiento, gracias a sus propiedades mecánicas, peso ligero, estabilidad, durabilidad e inercia, además, de que día a día son utilizados en un amplio rango de aplicaciones. Esto ha provocado cantidades masivas de residuos plásticos que han generado una gran contaminación en, prácticamente, todos los ecosistemas del mundo. Un ejemplo de ello es el descubrimiento de los microplásticos (es decir, partículas de plástico con un tamaño entre 1 y



1000  $\mu\text{m}$ ) que han invadido, principalmente, todos los mares del planeta, por lo que han tenido una atención importante por parte de los investigadores. Por otro lado, otra fuente de contaminación grave pasada por alto, son los polímeros solubles en agua, que son materiales orgánicos que se usan para aplicaciones como pintura, revestimientos, adhesivos, agentes de lavado, productos farmacéuticos, productos de cuidado personal y cosméticos. Falta mucha investigación en esta área ya que se desconocen su ecotoxicidad, biodegradabilidad y su impacto general en el medio ambiente, como informan y analizan Rozmán y col. (2021), quienes dejan claro que existe una necesidad urgente de investigar sus efectos a largo plazo ya que pueden traer consigo consecuencias ambientales críticas igual que los residuos sólidos (Rozman y Kalčíková, 2021). Actualmente casi todos los productos comerciales están hechos, envasados y/o transportados en componentes plásticos. Además, a causa de la pandemia del COVID-19 el número de residuos plásticos se incrementó debido a las restricciones de salud, que provocaron un aumento considerable en el uso de cubrebocas desechables, envases de gel antibacterial, guantes, etc.

La Procuraduría Federal del Consumidor (PROFECO, 2021) ofrece datos sobre la producción y residuos que generan los polímeros de un solo uso, como:

- Los plásticos de un solo uso representan el 50% de los polímeros que se producen cada año.
- El 40% de los plásticos que se fabrican, son utilizados en envases que se desechan tras un solo uso.
- La contaminación de los mares por plásticos ha provocado que mueran anualmente 100 000 tortugas y mamíferos marinos y un millón de aves marinas.
- Se proyecta que en el 2050 habrá más plásticos que peces en el océano.
- Se estima que 8 millones de toneladas de plástico llegan a los océanos cada año (PROFECO, 2021).

Debido al desastre ecológico que se está ocasionando con tanta contaminación, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) aprobó



la agenda 2030, la cual establece 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS) encaminados a construir una sociedad saludable y sostenible (Figura 1). La adopción de materiales sostenibles no solo mejora la calidad de vida de los consumidores, sino que también genera beneficios para toda la comunidad al reducir los costos operativos, así como el consumo de energía y la gestión de residuos. La ciencia de los materiales es una herramienta invaluable que puede ayudar a cumplir los objetivos de ODS 2: hambre cero, ODS 3: buena salud y bienestar, ODS 6: agua limpia y saneamiento, ODS 7: energía limpia y asequible, ODS 9: industria, innovación e infraestructura, ODS 11: ciudades sostenibles y comunidades, ODS 12: producción y consumo responsables, ODS 13: acción climática y ODS 14: vida submarina, se encuentran entre los 17 ODS (Samir y col., 2022).



Figura 1. Objetivos OSD.

Fuente <https://es.unesco.org/sdgs>

Gilani y col. (2023) proponen que, para cumplir con las ODS, la comunidad necesita aprender más sobre los riesgos de los plásticos y cómo reciclarlos, además, las leyes deben ser más rigurosas en temas de producción de plástico nuevo. Existen varios países, por ejemplo, Canadá, que están desarrollando políticas nuevas y haciendo planes para dejar de usar plásticos derivados del petróleo como alternativa para eliminar por completo los residuos plásticos antes del año 2030. Para resolver esta problemática es necesaria una solución viable para el embalaje como la utilización de los desechos de alimentos. Ya que



además de que el desperdicio de los alimentos crece junto con el incremento de la población y estos son desechados en vertederos o se queman lo cual agrava los problemas ambientales (Gilani y col., 2023).

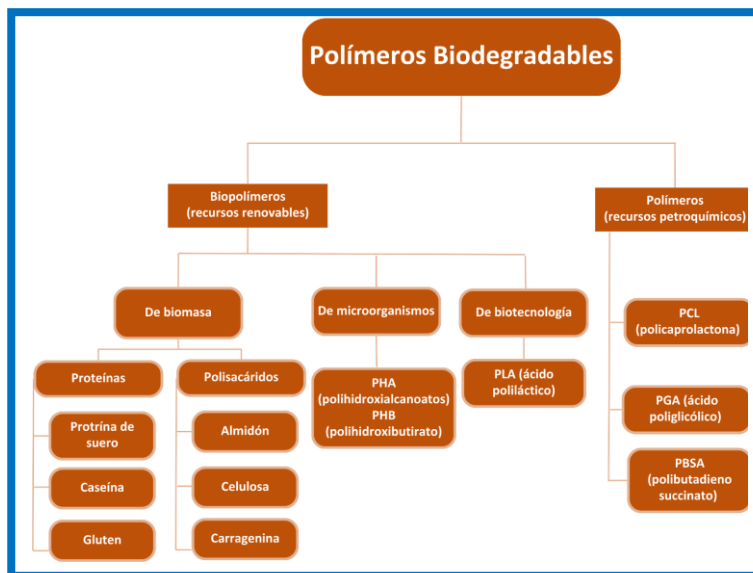
La solución a la contaminación por plásticos que se ha implementado actualmente (incineración, reciclaje y vertederos) es parcial y no ha puesto fin a la grave problemática. Esto debido a la enorme cantidad de desechos plásticos que genera la sociedad, aunado a la incapacidad que tienen estos materiales para degradarse en cortos períodos de tiempo: es de crucial importancia buscar materiales alternativos que se degraden en tiempos cortos o que sean afectados por microorganismos o factores ambientales que les ayuden a disminuir su tiempo de degradación. Una alternativa a la que están apostando muchos investigadores es el uso de materiales biodegradables, que principalmente sean producidos por fuentes renovables (Rodríguez y col., 2022).

En este artículo se presentan algunas de las principales características, ventajas y aplicaciones de los polímeros biodegradables en diversas áreas de las ciencias, haciendo énfasis en los tipos de polímeros biodegradables que se producen a partir de fuentes naturales, que los hacen materiales idóneos ya que no contaminan ni producen residuos tóxicos.

## CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS BIODEGRADABLES

Un polímero biodegradable se define como un polímero que se descompone fácilmente en el medio ambiente con la ayuda de enzimas (catalizadores biológicos que se encuentran en el medio ambiente). Estas enzimas ayudan a acelerar su descomposición logrando que se vuelvan biomasa, dióxido de carbono y agua, sin generar sustancias químicas peligrosas o contaminantes en el medio ambiente (Luyt y Malik, 2018). Esto convierte a los polímeros biodegradables en materiales muy prometedores, ya que una vez que concluyen su vida útil, se degradan, por lo que ayuda a la preservación del medio ambiente y la reducción de la contaminación. A continuación, se presenta la clasificación de los polímeros biodegradables.

Los polímeros biodegradables se pueden clasificar en tres tipos según su origen: naturales, sintéticos y semisintéticos. Los naturales, como su nombre lo indica, provienen completamente de fuentes de este tipo, los sintéticos se producen a partir de procesos químicos y los semi sintéticos son un híbrido de los dos anteriores. En la Figura 2 se muestra un diagrama de la clasificación de los polímeros biodegradables y algunos ejemplos.



**Figura 2.** Clasificación de los polímeros biodegradables.  
Fuente (Zhong y col., 2020).

Actualmente los polímeros de base biológica se sintetizan a partir de recursos renovables mediante procesos químicos, físicos y/o bioquímicos. Las materias primas más utilizadas para su fabricación son agrícolas y forestales, tales como como fibra de maíz, subproductos del trigo, desechos del procesamiento de alimentos, lodos de fábricas de papel, desechos forestales, entre otros. Esto les otorga una gran ventaja respecto a los polímeros sintéticos, por su responsabilidad ambiental, biocompatibilidad y biodegradabilidad. Xie y col. (2023) presentan una revisión sobre biopolímeros sintetizados a partir de recursos renovables, donde proponen que los desafíos a vencer son la fabricación amigable con el medio ambiente, además de requerir una alta proporción de materia prima de origen biológico y la reducción de costos de

producción; así como mejorar las propiedades mecánicas de los biopolímeros para que sean comparables a las de sus homólogos derivados del petróleo, y se les podrían agregar funciones adicionales. Con un aumento de inversión y de la mano de obra con avances tecnológicos se espera que terminen ocupando un amplio mercado en el futuro (Xie y col., 2023).

Los polímeros biodegradables ya tienen aplicaciones importantes en nuestra vida, por ejemplo, en el área industrial, los plásticos biodegradables ayudan a reducir la basura y, por ende, la contaminación. Esto significa que los envases y los productos hechos con estos plásticos se descomponen en la naturaleza sin causar daño, lo que es bueno para el medio ambiente. La degradación enzimática descompone a los biopolímeros en moléculas más pequeñas, sin embargo, los oligómeros (polímeros de muy bajo peso molecular), materiales resultantes de la descomposición de los biopolímeros, pueden persistir en el ambiente y afectar los organismos, por lo que es importante asegurarse que los subproductos intermedios durante la descomposición en el ciclo de vida, derivados de los biopolímeros, no afecten al medio ambiente. Yoshinaga y col. (2023) concluyeron que aparte de verificar la seguridad del producto y su degradación, también se debe evaluar cómo los productos intermedios afectan al medio ambiente en su descomposición durante el ciclo de vida (Yoshinaga y col., 2023). Por otro lado, en el área médica, los plásticos biodegradables son útiles para hacer suturas que se deshacen en el cuerpo sin necesidad de quitarlas después de una cirugía. También se usan para transportar medicamentos en el cuerpo de manera segura y controlada. Asimismo, los plásticos biodegradables se utilizan en productos como bolsas de compras y utensilios desechables. Esto significa que estos objetos que se utilizan todos los días pueden descomponerse naturalmente, y no contribuyen a la contaminación.

## BIOPOLÍMEROS PARA USO COTIDIANO

Actualmente el 50% de los desechos plásticos se debe a los polímeros de un solo uso (envases). En este sentido Wu y col. (2021) presentan



los retos y las nuevas oportunidades para generar envases biodegradables, entre ellos la de mejorar las propiedades de barrera contra vapor de agua de los biopolímeros para que se puedan utilizar estos envases en la vida diaria, reduciendo drásticamente la producción de basura (Wu y col., 2021).

Zhong y col. (2020) proponen usar mezclas de polímeros sintéticos y naturales como el almidón. El almidón es una buena opción ya que es muy barato y totalmente biodegradable, sin embargo, es muy sensible a la humedad, y sus bajas propiedades mecánicas son dependientes de la humedad. El almidón se ha mezclado con polímeros que son resistentes al agua para ser utilizados como empaques, presentando buenas propiedades mecánicas además de biodegradables y económicos. Los polímeros que se han utilizado para hacer este tipo de mezclas con poliolefinas, polihidroxialcanoatos (PHA), ácido poliláctico (PLA) y policaprolactonas (PCL), los cuales los han procesado por soplado de película, extrusión, inyección y espumados. Algunos autores proponen que los nanocompuestos y la mezcla de poliméricos sintéticos y naturales, serían las mejores herramientas para generar envases biodegradables o con actividad antimicrobiana (Zhong y col., 2020). A continuación, se presenta una breve descripción de los biopolímeros más usados en la actualidad.

- **Ácido poliláctico (PLA)**

El ácido poliláctico (PLA) es un polímero biodegradable que se obtiene a partir del ácido láctico, el cual se produce durante la fermentación de cultivos renovables, como la remolacha azucarera y el maíz. Este material puede sintetizarse mediante fermentación bacteriana o a partir de productos petroquímicos, lo que lo hace accesible y económico. El PLA ha ganado popularidad como un polímero biodegradable para envases debido a sus propiedades de rigidez, transparencia, facilidad de procesamiento y biocompatibilidad. En comparación con otros biopolímeros como polihidroxialcanoatos (PHA) y policaprolactonas (PCL), también destaca por su mejor capacidad de procesamiento térmico. Esto significa que se puede utilizar en una variedad de métodos de fabricación, como moldeo por inyección, soplado de película,



fundición de película, hilado de fibras, termoformado, impresión 3D, entre otros. Sin embargo, el PLA tiene una baja resistencia a la permeación de oxígeno y también es frágil con menos del 10% de deformación a la rotura. Estas propiedades limitan sus aplicaciones, que requieren deformación plástica a niveles de tensión más altos (Zhong y col., 2020).

- Polihidroxicanoato (PHA)

Los polihidroxicanoatos (PHA) se producen donde hay una limitación de nutrientes y un exceso de fuentes de carbono, que pueden incluir glucosa, sacarosa, triglicéridos, almidones, celulosa, suero, melaza, glicerol, salvado de cereales, aguas residuales, residuos municipales y ácidos orgánicos, entre otros. Se generan por diversas cepas bacterianas, como *Prieta megaterium* (anteriormente conocido como *Bacillus megaterium*), *Wautersia eutropha* y *Aeromonas hydrophila*, que se encuentran principalmente como almacenamiento de carbono y energía. Actualmente son ampliamente utilizados en diversas industrias, para envasado de alimentos, biocombustibles y purificación de proteínas. Se están explorando en campos como la ingeniería de tejidos y la medicina regenerativa debido a sus propiedades beneficiosas. Son considerados seguros, ya que normalmente no son cancerígenos ni pirógenos (no inducen fiebre cuando entran en contacto con el cuerpo), tampoco genotóxicos (que no causa daño al material genético como ADN y ARN de las células) ni alérgicos y no hemolíticos (no causa la destrucción de glóbulos rojos). Presentan propiedades fisicoquímicas destacadas, como alta resistencia a la tracción, porosidad, termoplasticidad, flexibilidad superficial, resistencia a la exposición a los rayos UV y piezoelectricidad. La aplicación de PHA está limitada a causa de sus deficientes propiedades mecánicas, su incompatibilidad con las técnicas de procesamiento térmico convencionales debido a su susceptibilidad a la degradación térmica (Žur-Pińska y col., 2023; Zhong y col., 2020).

- Policaprolactona (PCL)

La policaprolactona (PCL) es un poliéster alifático que se compone de monómeros de hexanoato, la cual se puede sintetizar por diferentes rutas como la policondensación de monómeros, a partir del monómero  $\epsilon$ -caprolactona. Comparada con otros plásticos que se descomponen naturalmente, la PCL tiene características únicas. Se mezcla y combina fácilmente con otros plásticos, lo que la hace muy versátil. La PCL se descompone lentamente, por lo que es útil cuando se necesita una aplicación de largo plazo. Diversos experimentos han demostrado que es poco tóxica, compatible con tejidos humanos y económica de producir. Por estas razones, su uso está en aumento, especialmente en campos como la ingeniería biomédica, la farmacia (liberación controlada de medicamentos) y el diseño de envases, entre muchas otras aplicaciones. No obstante, el uso de la PCL en empaques ha estado limitado debido a su elevado costo y su punto de fusión bajo. Sin embargo, su importancia como material de empaque ha vuelto a resurgir gracias a su capacidad para mezclarse y ser compatible con otros plásticos biodegradables (celulosa, hemicelulosa y lignina). Esto ha permitido reducir el costo, además de mejorar sus propiedades tales como aumentar el grado de cristalinidad, punto de fusión del material, mejorando así su aplicabilidad en la fabricación de envases (Camila y Hurtado, 2020).

## POLÍMEROS BIODEGRADABLES PARA USO BIOMÉDICO

Los polímeros biodegradables están revolucionando la forma en que se enfrentan diversos desafíos médicos, ya que ofrecen soluciones innovadoras para la administración de fármacos, dispositivos médicos y terapias regenerativas, al tiempo que reducen el impacto ambiental de los residuos plásticos. A continuación, se exponen algunas de las aplicaciones más prometedoras de los polímeros biodegradables en la medicina moderna y cómo están, no solo reemplazando los sintéticos no biodegradables, sino además superándolos.



Los biopolímeros, actualmente, son materiales esenciales para administrar fármacos y diversos compuestos bioactivos. Para que un biopolímero pueda ser aplicado en la medicina necesita cumplir con varios requerimientos, entre ellos ser biocompatible, biodegradable, farmacocinética y además poder circular en la sangre, ser excretado vía renal. Por lo anterior, Hrochová y col. (2023) proponen utilizar la polimerización radicalica controlada como una herramienta para la síntesis de polímeros en bloque que sean biodegradables y sensibles a diferentes estímulos y lenta degradación, los cuales pueden servir en un futuro como biomateriales para la administración de fármacos (Hrochová y col., 2023). La impresión 3D ofrece ventajas sobre los métodos de fabricación tradicionales, como alta eficiencia de fabricación, bajo costo de material y la capacidad de diseñar estructuras más complejas y personalizables. La impresión 3D se utiliza para fabricar stents vasculares de polímeros biodegradables (BPVS) utilizando materiales como ácido poliláctico (PLA) y policaprolactona (PCL), así como aleaciones de magnesio y zinc. Actualmente estos cuentan con peso ligero, resistencia radial, mejor biocompatibilidad, buena maquinabilidad y biodegradabilidad. A pesar de esto, algunas de estas características aún se buscan optimizar para diseñar nuevos materiales, innovar procesos de impresión 3D que sean versátiles y caracterizar con precisión el rendimiento de los *stents* vasculares de polímeros biodegradables (BPVS) después de la impresión. Se busca que los BPVS de la siguiente generación posean excelentes propiedades mecánicas, morfológicas y biológicas, sin embargo, a pesar de los avances, se necesita mayor optimización para diseñar nuevos materiales, innovar procesos de impresión 3D versátiles y caracterizar con precisión el rendimiento de los BPVS después de la impresión (Hua y col., 2022).

Existe un interés en aumento en el tratamiento de diversas enfermedades y trastornos relacionados con los huesos utilizando compuestos cerámicos y polímeros biodegradables. Estos materiales desempeñan un papel clave en la medicina moderna y pueden utilizarse en cuidado de heridas, dispositivos ortopédicos, aplicaciones dentales, cardiovas-

culares, administración de fármacos e ingeniería de tejidos (Alizadeh-Osgouei y col., 2019).

El desarrollo de materiales piezoeléctricos biodegradables, que generen cargas eléctricas en respuesta al estrés mecánico y viceversa, tiene un gran potencial para diagnóstico médico y dispositivos terapéuticos. Varios materiales orgánicos presentes en organismos vivos tienen piezoelectricidad, tales como aminoácidos, colágeno, celulosa de madera, huesos, materiales genéticos, ácido desoxirribonucleico (ADN), ácido ribonucleico (ARN) y córneas humanas. Estos materiales pueden descomponerse naturalmente y se están investigando biopolímeros, polímeros sintéticos y materiales inorgánicos para su fabricación. El mercado global de dispositivos médicos implantables ha crecido significativamente y se espera que supere los 179 mil millones de dólares en 2030, con dispositivos que utilizan material piezoeléctrico desempeñando un papel importante en este crecimiento (Liu y col., 2023).

Los hidrogeles superabsorbentes (SAH) se refieren a redes de polímeros hidrófilos (orgánicos o inorgánicos) que pueden absorber y retener enormes cantidades de agua en sus redes tridimensionales, hasta 500-1500 g/g. Se han creado muchos materiales superabsorbentes (SAH) a partir de polímeros, ya sean sintéticos o naturales. Sin embargo, en la última década, ha habido un aumento significativo en el uso de biopolímeros como una opción interesante en lugar de los polímeros sintéticos para desarrollar estos materiales. Esto se debe a que los biopolímeros son biodegradables, biocompatibles, no tóxicos y tienen una alta capacidad de absorción y resistencia a la sal; lo que los hace eficientes para aplicaciones, como administración de fármacos, acondicionamiento del suelo, biodetección, encapsulación de alimentos, liberación sostenida de fertilizantes, etc. La reticulación de los polisacáridos es una ruta eficiente para lograr nuevos SAH. Además, se han sintetizado con éxito y explorado SAH derivados de la modificación o reticulación de materiales como celulosa, quitosano, goma guar, pectina, quitina, colágeno, goma xantana, dextrano y alginato en diversas aplicaciones. Rather y col. (2022) en su artículo sobre hidrogeles super absorbentes basados en polímeros investigaron y concluyeron que los polímeros naturales son altamente valorados debido

a sus numerosas ventajas, como su sostenibilidad y biocompatibilidad, en comparación con los polímeros sintéticos. Tienen una amplia gama de propiedades útiles y pueden adaptarse para diversas aplicaciones, lo que abre oportunidades significativas en tecnología de polímeros superabsorbentes en el futuro (Rather y col., 2022).

## POLÍMEROS BIODEGRADABLES EN LA INDUSTRIA

Con su capacidad para ofrecer alternativas sostenibles y respetuosas con el medio ambiente, los polímeros biodegradables están encontrando aplicaciones innovadoras en una variedad de sectores industriales. Desde el embalaje hasta la construcción, estos materiales están ganando terreno como soluciones viables para reducir la huella ambiental y promover la economía circular. Ahora se darán a conocer algunas de las aplicaciones más destacadas de los polímeros biodegradables en la industria moderna y cómo están guiando el camino hacia un futuro más sostenible y consciente del medio ambiente.

Las fibras naturales están ganando popularidad en la industria automotriz, aeroespacial y de la construcción, ya que son fáciles de trabajar, reducen las emisiones de CO<sub>2</sub> y son biodegradables y reciclables. Los principales componentes son celulosa, hemicelulosa y lignina. Las fibras naturales utilizadas como refuerzo son capaces de fortalecer los materiales compuestos a base de matrices poliméricas, impartiendo sus propiedades a la matriz. Algunas de estas propiedades son la alta resistencia, rigidez específica, ligereza, baja peligrosidad, son renovables y biodegradables, además son poco abrasivas y capaces de reducir el desgaste en los equipos de procesamiento. A pesar de las ventajas de las fibras vegetales, enfrentan desafíos como la pérdida de resistencia al estar al aire libre, menor durabilidad y la capacidad de absorber humedad, por lo que la necesidad se centra en más investigación para usar estos compuestos de fibras vegetales en aplicaciones que requieren alta carga y basadas en temperatura (Parameswaranpillai y col., 2023; Martínez y col., 2021).



Dua y col. (2023), en su artículo sobre el potencial de los compuestos poliméricos a base de fibras naturales para una producción más limpia de componentes automotrices, afirman que el uso de fibras naturales en la industria automotriz está intentando cambiar hacia compuestos de base celulósica debido a sus propiedades como alto modulo, alta resistencia, facilidad de modificación, peso ligero y claramente menor contaminación, sin embargo por el momento solo es adecuado principalmente para partes internas y para insonorización debido a su capacidad para absorber sonido. Su uso en comparación con los materiales tradicionales, las fibras puras tienen limitaciones que superan sus ventajas. La alternativa de reforzarlas con materiales sintéticos también tiene sus limitaciones, incluida la falta de rigidez en áreas de alto rendimiento y problemas de no apoyar completamente al reciclaje y degradación. Por lo cual se necesita una investigación exhaustiva para evaluar el uso de fibras puras tanto en áreas de alto como bajo rendimiento en la industria automotriz (Dua y col., 2023).

Otro ejemplo del potencial de las fibras naturales lo reportan Pantaloni y col. (2021) en su artículo sobre las fibras de lino, donde mencionaron que utilizar dichas fibras para reemplazar las de vidrio es el primer paso para reducir el impacto ecológico ocasionado por los materiales compuestos termoestables, y el empleo de una matriz termoplástica biodegradable permite el reciclaje y compostaje, una vez terminada su vida útil. Concluyen en su análisis que gracias a la adherencia entre fibras de lino y los polímeros biodegradables (PHA), poli-(succinato de butileno) (PBS) y (PLA) estos deben explotarse ya que cuentan con interesantes propiedades mecánicas y conducen a materiales reciclables y compostables de rendimiento medio (Pantaloni y col., 2021).

Como se mencionó anteriormente, los desechos de alimentos aumentan a la par de la población, lo que ocasiona mayor contaminación al eliminar los residuos, sin embargo, algunos residuos pueden utilizarse como rellenos, tales como las cáscaras de nuez. Estos residuos tienen una composición que las hace adecuadas como relleno natural en compuestos debido a su alto contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa. Además, son fáciles de conseguir, renovables, no

tóxicas y económicas. Esto se debe a que los rellenos naturales tienen características positivas como fluidez adecuada, propiedades mecánicas y térmicas necesarias, biodegradabilidad, sostenibilidad y bajo costo, lo que los convierte en una opción respetuosa con el medio ambiente. Son un relleno natural ideal que se puede agregar a polímeros o almidón para crear un biocompuesto. McNeill y col. (2023) hicieron pruebas para determinar que el moldeo por inyección de una matriz de mezcla de PBSA/PBAT (polibutirato adipato tereftalato) con un alto nivel de carga natural de polvo de cáscara de nuez mostró resultados positivos. Por lo cual los compuestos se pueden utilizar para envases rígidos y al mismo tiempo, reducir los costos y reutilizar los desechos de alimentos (McNeill y col., 2023).

Otro caso de aplicación es el bambú con un gran potencial ya que existen alrededor de 1250 especies de bambú en todo el mundo, y su cultivo extenso en países asiáticos podría satisfacer la creciente demanda global de materiales lignocelulósicos (materiales que contienen lignina y celulosa). La investigación sobre el uso de compuestos poliméricos reforzados con fibras de bambú, como alternativa a los compuestos convencionales a base de petróleo, ha aumentado considerablemente debido a la creciente necesidad de materiales respetuosos con el medio ambiente en diversas industrias. Se puede aprovechar como relleno para reforzar polímeros, además de que es un recurso natural con un crecimiento acelerado, es una opción ecológica y prometedora en diferentes aplicaciones gracias a sus buenas propiedades mecánicas, térmicas y ecológicas. Aunque el bambú posee propiedades mecánicas y físicas excepcionales y es un recurso renovable, su uso en compuestos poliméricos no es tan popular como los compuestos reforzados con fibras sintéticas. Por lo cual se promueve el desarrollo de biocompuestos reforzados con fibra de bambú para diferentes aplicaciones estructurales. Actualmente estos estudios permiten su incorporación en una amplia gama de campos, incluidos el transporte, la aviación, la construcción y los productos de consumo. Hasan y col. (2023) hicieron una revisión de literatura del uso del Bambú como fibra para reforzar polímeros y concluyen que esperan que estos materiales se utilicen ampliamente en varios sectores

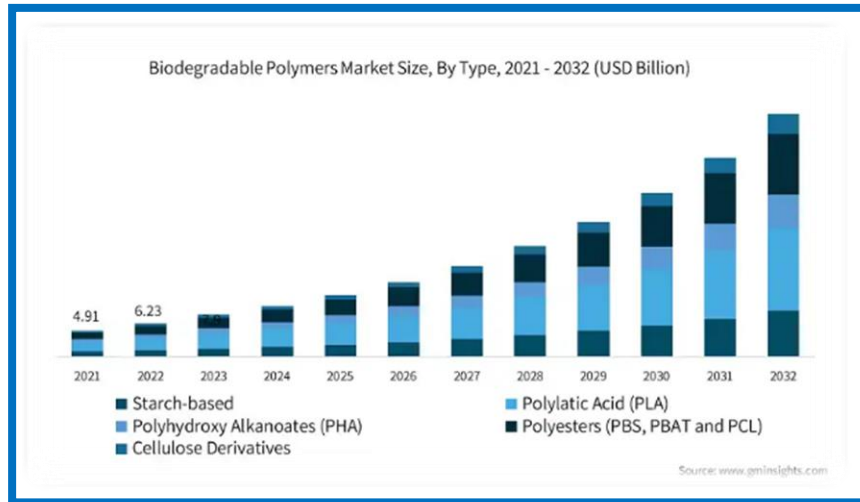
industrias: automotrices, de construcción y aeroespacial (Hasan y col., 2023).

En resumen, los polímeros biodegradables son una fuerza transformadora en la industria, ofrecen soluciones innovadoras que no solo abordan los desafíos actuales, sino que también promueven un futuro más sostenible y respetuoso con el medio ambiente. Con su capacidad para reducir la contaminación plástica y ofrecer alternativas renovables, estos materiales están desempeñando un papel crucial en la transición hacia una economía circular y una sociedad más consciente del impacto ambiental.

### PERSPECTIVAS A FUTURO SOBRE LOS POLÍMEROS BIODEGRADABLES

El mercado de polímeros biodegradables, valuado en alrededor de USD 7,9 mil millones en 2023, se espera que experimente un crecimiento anual compuesto (CAGR) de más del 21,6% entre 2024 y 2032. Como se muestra en la Figura 2. Estos polímeros, obtenidos de fuentes renovables como el almidón de maíz, la caña de azúcar y la celulosa, representan una solución prometedora para la crisis global de contaminación plástica. Se anticipa que con el apoyo de los países antes mencionados, así como de la ODS, el crecimiento de la industria alcanzará un valor de mercado de más de USD 45 mil millones en 2032. En base a su tipo los polímeros biodegradables se pueden dividir en PLA, PHA, poliésteres, derivados de la celulosa y base Starch (almidón) estos últimos son los líderes de este mercado con USD 1.5 millones en 2023 y con una proyección de USD 8.600 millones en 2032, como se muestra en la Figura 3.

A continuación, se presentan algunas de las aplicaciones más destacadas de los polímeros biodegradables en diferentes industrias.



**Figura 3.** Proyección del mercado de los polímeros biodegradables.

Fuente <https://www.gminsights.com/es/industry-analysis/biodegradable-polymers-market>.

Los polímeros biodegradables se perfilan como la base del futuro. Actualmente, los polímeros sintéticos no biodegradables son parte integral de nuestra vida diaria, pero su impacto ambiental es alarmante debido a su toxicidad y su resistencia a la degradación, lo que resulta en una seria amenaza para el entorno. Sin embargo, los polímeros biodegradables ofrecen una solución viable para satisfacer nuestras necesidades actuales. Si bien es cierto que los polímeros biodegradables aún presentan algunas desventajas en términos de rendimiento en comparación con los polímeros sintéticos no biodegradables, estas limitaciones se ven contrarrestadas por sus notables ventajas, como la biocompatibilidad y la capacidad de degradarse naturalmente, además de la posibilidad de reciclaje. Es importante destacar que, aunque los costos de producción de polímeros biodegradables pueden ser una de sus principales desventajas, no obstante, se pueden mitigar mediante estrategias de reutilización, la cual se mencionó debe tomarse en cuenta a la hora de hacer los presupuestos o diseños de producción y el apoyo de instituciones, es decir, países comprometidos con la reducción de residuos plásticos, como Canadá, que está implementando prohibiciones y multas para abordar este problema.

## CONCLUSIONES

Se encontró que los polímeros biodegradables están revolucionando múltiples áreas de la medicina, gracias a su capacidad de ser respetuosos con el medio ambiente, biocompatibles y versátiles. Esto está dando lugar a avances significativos y prometedores por lo que se promueve a seguir investigando la sinterización de nuevos materiales y aplicaciones.

A pesar del creciente uso de polímeros biodegradables en diversas industrias como la automotriz, construcción y aeroespacial, aún existen limitaciones en cuanto a sus propiedades y costos de producción. Es fundamental continuar con la investigación para superar estos retos y garantizar una transición eficaz.

Los polímeros biodegradables están experimentando un significativo crecimiento en las áreas industriales y biomédica. Aún existen en las dos áreas incógnitas en las que hace falta investigar más para conocer todos los impactos de algunos productos en el medio ambiente. Además, existen problemas para los que ya se plantean soluciones, sin embargo, estas únicamente son la base o es una zona aun sin explorar.

Por lo tanto, con el apoyo de las instituciones, se debe fomentar la educación sobre el tema para reducir la basura que se genera, así como apoyar la investigación para buscar soluciones y optimizar los resultados actuales para ser más viables económicamente y eficientes.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Coahuila por el apoyo brindado para llevar a cabo esta revisión de literatura, además, al CONAHCYT por la beca de maestría otorgada.

## REFERENCIAS

- Alizadeh-Osgouei, M., Li, Y., & Wen, C. (2019). A comprehensive review of biodegradable synthetic polymer-ceramic composites and their manufacture for biomedical applications. *Bioactive Materials*, 4 (1): 22–36. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2018.11.003>
- Dua, S., Khatri, H., Naveen, J., Jawaid, M., Jayakrishna, K., Norrrahim, M. N. F., & Rashedi, A. (2023). Potential of natural fiber based polymeric composites for cleaner automotive component production -a comprehensive review. *Journal of Materials Research and Technology*, 25: 1086–1104. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.019>
- Gilani, I. E., Sayadi, S., Zouari, N., & Al-Ghouti, M. A. (2023). Plastic waste impact and biotechnology: Exploring polymer degradation, microbial role, and sustainable development implications. *Bioresource Technology Reports*, 24: 101606. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101606>
- Hasan, K. M. F., Hasan, K. N. Al, Ahmed, T., György, S. T., Pervez, M. N., Bejő, L., Sándor, B., & Alpár, T. (2023). Sustainable bamboo fiber reinforced polymeric composites for structural applications: A mini review of recent advances and future prospects. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8: 100362. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100362>
- Hrochová, M., Kotrchová, L., Frejtková, M., Konefał, R., Gao, S., Fang, J., Kostka, L., & Etrych, T. (2023). Adaptable polymerization platform for therapeutics with tunable biodegradability. *Acta Biomaterialia* 171: 417-427. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2023.09.004>
- Hua, W., Shi, W., Mitchell, K., Raymond, L., Coulter, R., Zhao, D., & Jin, Y. (2022). 3D Printing of Biodegradable Polymer Vascular Stents: A Review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, 1(2): 100020. <https://doi.org/10.1016/j.cjmeam.2022.100020>
- Kibirskītis, E., Mayik, V., Zatserkovna, R., Vaitasius, K., Stepanenko, A., Kandrotaitė-Janutienė, R., Venyte, I., & Danilovas, P. P. (2022). Study of physical and mechanical properties of partially biodegradable LDPE polymeric films and their application for printing and packaging. *Polymer Testing*, 112: 107646. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107646>
- Liu, T., Wang, Y., Hong, M., Venezuela, J., Shi, W., & Dargusch, M. (2023). Advances in biodegradable piezoelectrics for medical implants. *Nano Today*, 52: 101945. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2023.101945>



- Marturano, V., Marotta, A., Salazar, S. A., Ambrogi, V., & Cerruti, P. (2023). Recent advances in bio-based functional additives for polymers. *Progress in Materials Science*, 139: 101186. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101186>
- Mazur, F., Pham, A.-H., & Chandrawati, R. (2023). Polymer materials as catalysts for medical, environmental, and energy applications. *Applied Materials Today*, 35: 101937. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2023.101937>
- McNeill, D. C., Pal, A. K., Mohanty, A. K., & Misra, M. (2023). High biomass filled biodegradable plastic in engineering sustainable composites. *Composites Part C: Open Access*, 12: 100388. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2023.100388>
- Pantaloni, D., Rudolph, A. L., Shah, D. U., Baley, C., & Bourmaud, A. (2021). Interfacial and mechanical characterisation of biodegradable polymer-flax fibre composites. *Composites Science and Technology*, 201:108529. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108529>
- Parameswaranpillai, J., Gopi, J. A., Radoor, S., C. D., M. D., Krishnasamy, S., Deshmukh, K., Hameed, N., Salim, N. V., & Sienkiewicz, N. (2023). Turning waste plant fibers into advanced plant fiber reinforced polymer composites: A comprehensive review. *Composites Part C: Open Access*, 10: 100333. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100333>
- PROFECO, Procuraduría Federal del Consumidor (2021). *Contaminación por plástico*, en [www.gob.mx](http://www.gob.mx). [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/profeco/es/articulos/contaminacion-por-plastico?idiom=es>. Fecha de consulta: 22 de noviembre 2023.
- Rather, R. A., Bhat, M. A., & Shalla, A. H. (2022). An insight into synthetic and physiological aspects of superabsorbent hydrogels based on carbohydrate type polymers for various applications: A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 3:100202. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2022.100202>
- Rozman, U., & Kalčíková, G. (2021). The first comprehensive study evaluating the ecotoxicity and biodegradability of water-soluble polymers used in personal care products and cosmetics. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 228: 113016. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113016>
- Samir, A., Ashour, F. H., Hakim, A. A. A., & Bassyouni, M. (2022). Recent advances in biodegradable polymers for sustainable applications. *npj Materials Degradation*, 6 (68): 1-28. Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/s41529-022-00277-7>

- Wu, F., Misra, M., & Mohanty, A. K. (2021). Challenges and new opportunities on barrier performance of biodegradable polymers for sustainable packaging. *Progress in Polymer Science*, 117: 101395. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2021.101395>
- Xie, Y., Gao, S., Zhang, D., Wang, C., & Chu, F. (2023). Bio-based polymeric materials synthesized from renewable resources: A mini-review. *Resources Chemicals and Materials*, 2 (3): 223-230. <https://doi.org/10.1016/j.recmm.2023.05.001>
- Yoshinaga, N., Tateishi, A., Kobayashi, Y., Kubo, T., Miyakawa, H., Satoh, K., & Numata, K. (2023). Effect of Oligomers Derived from Biodegradable Polyesters on Eco- and Neurotoxicity. *Biomacromolecules*, 24(6): 2721–2729. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.3c00160>
- Zhong, Y., Godwin, P., Jin, Y., & Xiao, H. (2020). Biodegradable polymers and green-based antimicrobial packaging materials: A mini-review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 3 (1): 27-35. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.11.002>