

## **Polímeros sustentables con aplicaciones comerciales e industriales**

*Sustainable polymers with commercial and industrial applications*

**Área:** Biología y Química

Romeo Lizandro Dávalos Campos <sup>1</sup>, Víctor Adán Cepeda Tovar <sup>1\*</sup>, Lorena Farías Cepeda <sup>1\*</sup>, Anilú Rubio Ríos <sup>1</sup>, Lucero Rosales Marines <sup>1</sup>, Francisco Javier Enríquez Medrano <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Químicas, Blvd. V. Carranza S/N, 25280, Saltillo, Coahuila, México.

<sup>2</sup> Centro de Investigación en Química Aplicada, Enrique Reyna H. No. 140, San José de los Cerritos, 25294 Saltillo, Coahuila, México.

\*Correo de autor de correspondencia:

[v\\_cepeda\\_tovar@uadec.edu.mx](mailto:v_cepeda_tovar@uadec.edu.mx), [lorenafarias@uadec.edu.mx](mailto:lorenafarias@uadec.edu.mx)

## Resumen

Actualmente, la demanda de productos plásticos es muy alta a nivel mundial y va en aumento, lo que está causando afectaciones a los ecosistemas. Un ejemplo claro de esto, son los polímeros provenientes de fuentes sintéticas o petroleras considerados dañinos si no se les da un buen uso pos-consumo, dado que al ser utilizados de forma incorrecta pueden perjudicar al ambiente. El campo científico y tecnológico han realizado investigaciones a materiales poliméricos sustentables como una opción ambientalmente amigable y viable, con ello, han demostrado que dichos biocompuestos poseen propiedades tales como biodegradabilidad, actividad antimicrobiana y antioxidante, entre otras, lo que produce en ellos, ser buenos candidatos para aplicaciones futuras. En este manuscrito se exhibe un estudio bibliográfico sobre los biopolímeros, tomando en cuenta sus aplicaciones más sobresalientes y actuales con las que se cuenta actualmente, abordando así su manejo y disposición en el campo alimenticio y médico, principalmente.

**Palabras Clave:** *antioxidante, biodegradabilidad, biopolímeros, ecosistema, sustentables*

## Abstract

Currently, the demand for plastic products is very high worldwide and is increasing, which is causing damage to ecosystems. A clear example of this are polymers from synthetic or petroleum sources, considered harmful if they are not used properly after consumption, since when used incorrectly they can harm the environment. The scientific and technological field have carried out research on sustainable polymeric materials as an environmentally friendly and viable option, thereby demonstrating that these biocomposites have properties such as biodegradability, antimicrobial and antioxidant activity, among others, which produces in them, be good candidates for future applications. In this manuscript, a bibliographic study on biopolymers is exhibited, taking into account their most outstanding and current applications that

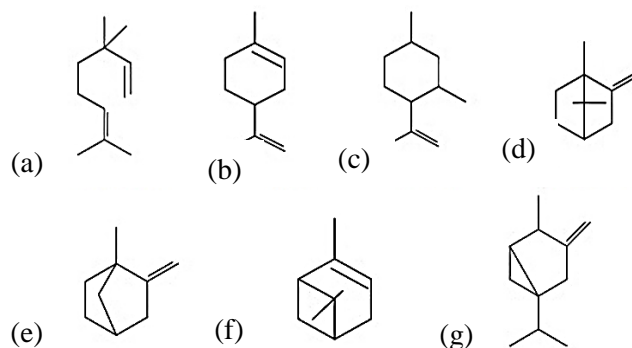
are currently available, thus addressing their management and disposal in the food and medical fields, mainly.

**Keywords:** *antioxidant, biodegradability, biopolymers, ecosystem, sustainable,*

## Introducción

El agotamiento de los recursos fósiles está generando un interés creciente hacia la obtención de materiales poliméricos derivados de recursos sostenibles. Siendo los polisacáridos y los politerpenos dos clases de materiales obtenidos partir de fuentes vegetales, o como biomásas de subproductos de especies vivas (Stevens y col., 2001; Lahaye y Robic, 2007; Rose y Palkovits, 2011). Los polisacáridos son productos orgánicos estructurados químicamente por heteroátomos enlazados covalentemente, considerados principalmente como compuestos hidrofílicos; mientras que los terpenos pertenecen a la biomasa rica en hidrocarburos de fuente renovable (Liu y Chung, 2017; Figueiredo y col., 2010; Zhao, y Schlaad 2011) y la polimerización de éstos puede dar origen a materiales con propiedades muy diversas. Los terpenos o terpenoides son moléculas insaturadas ramificadas o cíclicas que se extraen de la resina, proveniente principalmente de coníferas, las unidades estructurales los proveen de características tanto físicas, químicas y térmicas que los hacen propicios para la formulación de elastómeros o cauchos semisintéticos a través de reacciones de polimerización (Yao y Tang, 2013). Los terpenos representan una alternativa a las moléculas fósiles a partir de las cuales se manufacturan los elastómeros actualmente (butadieno, isopreno, etc.), a partir de biomasa rica en hidrocarburos, como semillas oleaginosas y aceite de palma (Silvestre y Gandini, 2008). Entre los primeros productos recuperados, el  $\alpha$  y  $\beta$ -pineno son una clase de moléculas con la capacidad de ser industrialmente transformadas en una serie de compuestos valiosos por varias reacciones químicas de polimerización, en las que se pueden enunciar, radicalica, aniónica, catiónica y metalocénico, por mencionar algunas (Firdaus y col., 2011; Zhao y col., 2015).

Algunos bloques de construcción de terpenos se han utilizado para la síntesis de diferentes polímeros hidrofóbicos como los revisados recientemente en la literatura (Singh y col., 2012; Alvès y col., 2014). En la Figura 1, se presentan las estructuras químicas de los terpenos extraídos de fuentes sustentables.

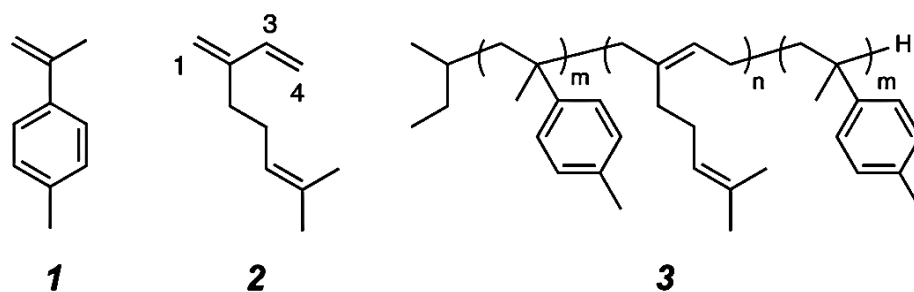


**Figura 1.** Estructuras químicas de los principales terpenos extraídos de fuente renovables: (a) Linalol, (b) Limoneno, (c) Mentol, (d) Canfora, (e) Fenchona, (f)  $\alpha$ -pineno, (g) Tujona (Silvestre y Gandini, 2008; Firdaus y col., 2011; Zhao y col., 2015)

## Aplicaciones generales de los terpenos como fuentes sustentables

Los terpenos suelen ser abundantes y baratos, lo que los suele hacer una materia prima ideal para la síntesis de fragancias, sabores, fármacos y solventes. Sin embargo, muy pocos de estos han sido estudiados como monómeros para producir biopolímeros (ver Figura 2). Solo el  $\alpha$ -pineno,  $\beta$ -pineno, limoneno y el mirceno han sido estudiados extensamente para la síntesis de polímeros, conocidos en el ámbito de los materiales, como monómeros vinílicos, en los que se pueden enlistar: estireno, acrilatos y derivados nitrogenados (acrilamidas, iminas, etc.) (Wilbon y col., 2012). Monoterpenos como el D-limoneno han sido utilizados clínicamente para disolver cálculos biliares que contienen colesterol. Además, debido a su efecto neutralizante de ácidos gástricos y su apoyo al peristaltismo, se ha usado para aliviar la acidez y el reflujo gastroesofágico (Chen y col., 2020).

El efecto de algunos terpenos en microorganismos ha sido estudiado desde 1980. Diferentes aceites de plantas, los cuales contienen terpenos, han mostrado inhibir múltiples especies de bacterias. Un ejemplo es el aceite de canela, este ha mostrado actividad de amplio espectro contra *Pseudomonas aeruginosa*. Además, gracias a que estos compuestos han sido incorporados en numerosos jabones antibacteriales, cosméticos y productos domésticos, se han realizado diferentes estudios descriptivos acerca de la absorción y penetración de terpenos en la piel, logrando de esta manera una mejora en la hidratación cutánea (Zhou y col., 2020).



**Figura 2.** Estructuras de AMMS (1), mirceno (2) y el copolímero tribloque de estos dos (3) (Bolton y col., 2014).

Un ejemplo de dichos terpenos es el *trans*- $\beta$ -farneseno que es una molécula hidrofóbica, un sesquiterpeno acíclico que se produce a través de un proceso de fermentación en estado sólido llevada a cabo a gran escala (Rahimi y García; 2017). Dicho proceso industrial produce exclusivamente *trans*- $\beta$ -farneseno y no  $\alpha$ -farneseno; esto es importante ya que solo el *trans*- $\beta$ -farneseno participa en las reacciones de Diels-Alder, (reacciones químicas llevadas a cabo por la acción de la temperatura) esto debido a la presencia de un dieno conjugado tipo *cis*. Dicho proceso industrial produce exclusivamente *trans*- $\beta$ -farneseno y no  $\alpha$ -farneseno.

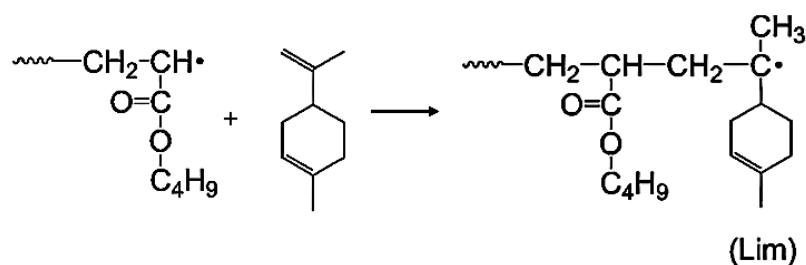
## Polimerizaciones de terpenos

El poli-limoneno (PLIM) es un biopolímero obtenido a partir de la polimerización del limoneno, el cual es un terpeno monocíclico obtenido a partir de aceites de frutas cítricas y otros aceites esenciales. En 2014, Zhang y Dubé reportaron la copolimerización del metacrilato de butilo (BMA) con D-limoneno mediante una polimerización en masa (libre de disolvente). Llevaron a cabo experimentos a baja conversión para calcular las relaciones de reactividad utilizando el modelo de Mayo-Lewis, encontrando que  $R_{BMA}=6.09$  mientras que el del  $R_{LIM}=0.045$ , lo que indica que se favorece la polimerización del BMA en la copolimerización con el limoneno. También llevaron a cabo experimentos utilizando BMA a altas concentraciones y confirmaron la exactitud de las relaciones de reactividad para predecir la composición del copolímero, la cual también confirmaron mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) (Zhang y Dube, 2014). Zhang y colaboradores, encontraron la relación de reactividad del acrilato de butilo (BuA) era favorecida en comparación con la del limoneno, encontrando mayores conversiones cuando usaban concentraciones altas de BuA.

El objetivo principal de Ren y colaboradores era incorporar moléculas de limoneno a las cadenas del poli(acrilato de butilo) (PBuA) para mejorar sus propiedades y poderlo usar como adhesivo y/o recubrimiento, siguiendo la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) del copolímero a diferentes composiciones, resultando en un incremento de la misma a mayor concentración de limoneno (ver Figura 3) (Ren y col., 2015).

De igual manera, en 2015, Ren y colaboradores reportaron la terpolimerización en masa del BuA, BMA y limoneno. Al igual que en el estudio previo, encontraron que entre mayor era la fracción de limoneno los porcentajes de conversión y el peso molecular disminuían. Pero encontraron que la composición del terpolímero resultó ser constante, esto debido a las concentraciones iniciales de los monómeros con

respecto a la conversión en los distintos experimentos realizados. En el caso de la Tg, encontraron que ésta incrementaba al tener una menor fracción de BuA y una composición mayor de BMA y limoneno (Ren y Dubé, 2015).



**Figura 3.** Mecanismo de propagación en la polimerización del D-limoneno con acrilato de butilo (BuA) (Ren y Dubé, 2015).

En el 2014, Bolton y colaboradores reportaron la polimerización de mirceno y  $\alpha$ -metil-p-metilestireno (AMMS) para la preparación de un copolímero en tribloque ABA para su uso como elastómero termoplástico, como alternativa a elastómeros obtenidos de monómeros sintéticos.

Bolton y colaboradores en el mismo año, 2014, realizaron una homopolimerización aniónica del AMMS en THF a 10 °C usando sec-butillitio como iniciador, resultando en una solución de PAMMS-Li. Para la síntesis del copolímero en tribloque ABA, se adicionó mirceno y luego AMMS a la solución de PAMMS-Li con diclorodimetilsilano como agente de acoplamiento, esto llevó a obtener los tribloques de PAMMS-PMYR-PAMMS (Figura 3). Después, caracterizaron mecánicamente los elastómeros sintetizados y encontraron que presentaban esfuerzos tensiles de 10 MPa y elongaciones cercanas a 1300%, además de obtener menores valores de temperatura de transición vítrea que los elastómeros hechos a base de monómeros sintéticos (Bolton y col., 2014).

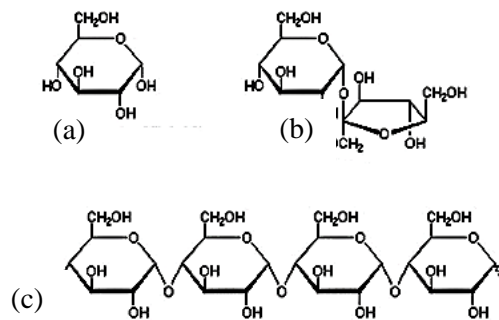
### Aplicaciones de los polisacáridos como fuentes sustentables

Los polisacáridos, son compuestos orgánicos con una vasta gama de aplicaciones en la vida diaria, a veces es necesario modificarlos para producir materiales con alto



valor agregado (Wang y col., 2009). Diversos autores han modificados polisacáridos a través de diferentes técnicas, como el injerto de polímeros sintéticos (monómeros acrílicos y algunas biomoléculas, proteínas, lípidos, etc.) mediante polimerizaciones vía radicales libres convencionales o controladas (Samadian y col., 2020; Durand y col., 2004). En este contexto, existe una iniciativa que le permite a los terpenos provenientes de fuente vegetal ser una alternativa en combinación con los polisacáridos para modificar las propiedades del producto de síntesis resultante (Thambi y col., 2016).

Los polisacáridos anfífilos (Figura 4), son polímeros muy versátiles que han ganado interés tanto en lo académico como en lo industrial. Por ejemplo, los compuestos derivados del acetato de celulosa, han revolucionado la producción de fibras y películas comerciales (García y Robertson, 2017). Otro claro ejemplo de estos son los almidones modificados con segmentos hidrofóbicos, los cuales son habitualmente usados en aplicaciones biomédicas (Vanmarcke y col., 2017) y alimentos (Zhang y col., 2014).



**Figura 4.** Estructuras químicas de los principales glúcidos extraídos de fuente renovable: (a) Monosacárido (glucosa), (b) Disacárido (Sacarosa), (c) Polisacárido (Amilosa) (Vanmarcke y col., 2017; Zhang y col., 2014).



Aunque el número de polisacáridos anfifílicos es finito, los agentes modificadores hidrofóbicos son numerosos y sus derivados funcionales prácticamente ilimitados. Los terpenos destacan, por su abundancia natural y diversidad estructural.

Existe una variedad de procesos químicos para sintetizar polisacáridos anfifílicos, la transesterificación organocatalítica es uno de ellos (Winkler y col., 2013; Easterling y col., 2017). La mayor parte del esfuerzo actual en la transesterificación organocatalítica se enfoca en el uso de polímeros que se pueden extraer de la naturaleza, en lugar de la síntesis de polímeros sintéticos (Onwukamike y col., 2018; Rahimi y García, 2017). Söyler y colaboradores en el 2020, mostraron la utilidad de la transesterificación en la síntesis de almidones de ésteres de ácidos grasos renovables. Ellos emplearon condiciones de reacción homogéneas y lograron materiales con un porcentaje de degradabilidad notablemente alto (Söyler y Meier, 2017).

## **Aplicaciones generales de los biopolímeros en el campo alimenticio, farmacéutico, cosmético, médico e ingenieril.**

### **Aplicaciones en el sector alimenticio**

En el campo agroindustrial se han encontrado reportes sobre el tratamiento del suelo con biopolímeros como un método de retención de agua para suelos insaturados, encontrando que al incluir un pequeño porcentaje (cercano al 1%) de goma xantana aumenta hasta un 25% el contenido de agua retenida, según lo reportado (Zhou y col., 2020).

El dextrano, es un compuesto orgánico que pertenece a la familia de los polisacáridos, recientes investigaciones han informado sobre el proceso de extracción de este biopolímero proveniente de los desechos metabólicos de los microorganismos del subsuelo; se ha usado en la separación de proteínas plasmáticas, en especial la albúmina. Además, de presentar una elevada disposición en la industria de alimentos como emulsificante. Para el caso de la goma

xantana (polisacárido extraído de fuentes sustentables), se emplea comúnmente en la industria de alimentos debido a su estabilidad térmica y su compatibilidad con el contenido de los productos alimenticios (humedad, color, olor, etc.). Por su parte, el quitosano (también biopolímero proveniente de la acetilación de la quitina) y sus derivados han sido utilizados en un amplio rango de aplicaciones, como adhesivo biológico, antioxidante, biopelículas, recubrimientos, biosensores, como también aplicaciones biomédicas (Nagaraj y Muguda, 2020).

De esta forma, se han empleado biopolímeros extraídos a partir de granos, semillas y cereales (leguminosos o lignocelulósicos) componentes básicos en la alimentación del ser humano, dado que son derivados de plantas, permiten una correcta disponibilidad, su producción es más económica, el impacto ambiental es bajo y son renovables, en comparación con aquellos alimentos derivados de animales. Algunos de los beneficios que estos prometen son la reducción de lípidos, bajos niveles de sodio y azúcar y la fortificación de moléculas bioactivas (Reddy y Yang, 2009; Hurtado y col., 2020; Honarkar y Barikani, 2009).

El concepto general para el campo de la nanotecnología enfocada en el estudio de los alimentos, considerado emergente y en rápida evolución, abarca una gama extremadamente amplia de disciplinas y ha encontrado diversas aplicaciones en diferentes sectores alimentarios. El estudio de los polisacáridos como biocompuestos o biomateriales, es actualizar el conocimiento actual sobre los enfoques basados en nanotecnología para preparar vehículos de liberación de compuestos bioactivos importantes. Se destaca particularmente el progreso de esta investigación en el desarrollo de nanopartículas hechas de biopolímeros alimentarios (proteínas y polisacáridos). Finalmente, Luo y colaboradores en el 2020, realizaron un trabajo de investigación, en el cual proporcionaron sugerencias para futuras indagaciones sobre el desarrollo de vehículos a nano escala seguros, efectivos y comestibles para aplicaciones alimentarias (Luo y Zhang, 2020).

Este biopolímero se puede extraer de las plantas y aislar como material bioplástico con diferentes aplicaciones, incluido el envasado de alimentos. Mellinas y colaboradores en el 2020, presentaron resultados de investigación sobre la pectina, incluida la estructura, los diferentes tipos, las fuentes naturales y el uso potencial en varios sectores, particularmente en los materiales de envasado de alimentos. Mellinas y colaboradores en el 2020, han estado trabajando en una multitud de aplicaciones de la industria de alimentos y bebidas relacionadas con la pectina, así como en combinaciones con otros biopolímeros para mejorar algunas propiedades clave, como el rendimiento antioxidante/antimicrobiano y la flexibilidad para obtener películas (Mellinas y col., 2020).

### **Aplicaciones farmacéuticas y cosméticas**

De los casos que han sido ya estudiados con referencia a biopolímeros compuestos por sales haloideas, los alginatos de sodio y calcio se ha empleado en la industria cosmeceutical y farmacéutica como espesante de medicamentos tópicos, en la industria química y textil en la formulación de detergentes para ropa, así como en la producción de impresión textil. Así mismo, el empleo de la goma arábiga, quitosano y almidón de trigo como biomaterial resistente al encogimiento de la tela de lana, ha demostrado ser un sustituto viable y ecológico, ya que no afecta las propiedades del material (como ligereza, calidez, aislamiento térmico, etc.), en contraste con los tratamientos convencionales, los cuales afectan las propiedades físico-mecánicas y el color del mismo, además del uso de contaminantes como lo es el haluro orgánico absorbible, el cual es actualmente una preocupación ambiental (Majee y col., 2017; Joye, 2019). Además, el quitosano (CS) y sus procedentes han sido utilizados en un amplio rango de aplicaciones, como adhesivo biológico, antioxidante, biopelículas, recubrimientos, biosensores, como también aplicaciones biomédicas (Sivakanthan y col., 2020).

Otras especies activas (polisacáridos) son provenientes de fuentes marinas para diversas aplicaciones, por ejemplo, el extracto de *fucoïdan*, proveniente de algas marinas y es utilizado por la industria cosmética como protector de radiación UV, etc. Además, este tipo de biopolímeros pueden ser empleados en aplicaciones farmacéuticas como liberador o retardantes de fármacos (Majee y col., 2017).

Otra aplicación de los biopolímeros es como agentes cicatrizantes, empleando diferentes polímeros como el colágeno, celulosa, quitosano, alginato, hialuronato, *fucoïdan* y carragenano son los compuestos biopoliméricos más usados con este propósito. Estos pueden tener propiedades antibacteriales, antiinflamatorias u otras acciones para células específicas, tomando un rol clave en el proceso de curación de una herida. Estos biopolímeros poseen ciertas propiedades que les permiten ser fácilmente moldeados en hidrogeles o mezclados con otros polímeros para aumentar su fuerza mecánica, propiedades bio-miméticas y cualquier otra propiedad deseada (Sahana y Rekha, 2018).

En este mismo contexto, el quitosano, el colágeno, la gelatina, el ácido poli-láctico y los polihidroxicanoatos son ejemplos notables de biopolímeros, que son esencialmente polímeros bioderivados producidos por células vivas. Con las técnicas adecuadas, estas macromoléculas biológicas pueden explotarse para avances nanotecnológicos, incluso para la fabricación de nano portadores. Para la nanotecnología, es esencial (y óptimo) que los nano portadores sean biocompatibles, biodegradables y no tóxicos para aplicaciones *in vivo* seguras, incluida la administración de fármacos, la inmunoterapia contra el cáncer, la ingeniería de tejidos, la administración de genes, la terapia fotodinámica y muchas más. Los avances recientes en la comprensión y estudio de las propiedades fisicoquímicas de los biopolímeros nos permiten modificar macromoléculas biológicas y utilizarlas en multitud de campos, sobre todo para aplicaciones clínicas y terapéuticas (Samrot y col., 2020).

Al utilizar quitosano, colágeno, gelatina, ácido poli-láctico, polihidroxialcanoatos y varios otros biopolímeros como ingredientes de síntesis, se pueden lograr fácilmente las propiedades propias de un nano portador, prácticamente propiedades antioxidantes y antimicrobianas (Samrot y col., 2020; Xia y col., 2020).

Otro aspecto importante, es el empleo de agentes de origen microbiano, capaces de producir subproductos metabólicos importantes. Las bacterias son fábricas celulares de primer orden que pueden convertir eficientemente las fuentes de carbono y nitrógeno en una gran diversidad de biopolímeros intracelulares y extracelulares, como polisacáridos, poliamidas, poliésteres, polifosfatos, ADN extracelular y componentes proteicos. De acuerdo con lo reportado por Moradali y colaboradores en el 2020, los polímeros bacterianos tienen funciones importantes en la patogenicidad y sus variadas propiedades químicas y materiales los hacen adecuados para aplicaciones médicas e industriales. Los mismos biopolímeros, cuando son producidos por agentes patógenos, funcionan como factores de virulencia principales, mientras que cuando son producidos por microorganismos no patógenos, se convierten en ingredientes alimentarios o biomateriales. La investigación interdisciplinaria ha arrojado luz sobre los mecanismos moleculares de la síntesis de polímeros bacterianos, ha identificado nuevos objetivos para fármacos antibacterianos y ha informado enfoques de biología sintética para diseñar y fabricar materiales innovadores. Según lo reportado en la literatura, papel que juegan los polímeros de fuentes metabólicas bacterianas en la patogénesis, su síntesis y sus propiedades materiales, así como los enfoques para diseñar fábricas de células para la producción de materiales de base biológica hechos a medida adecuados para aplicaciones de alto valor (Moradali y Rehm, 2020).

Se sabe que los compuestos de proteína-polisacárido muestran una amplia gama de aplicaciones en campos biomédicos y químicos verdes. Estos compuestos se han fabricado en una variedad de formas, como películas, fibras, partículas y geles, dependiendo de sus aplicaciones específicas.

Bealer y colaboradores en el 2020, demostraron, experimentalmente, que los tratamientos posteriores de estos compuestos, como la mejora de los cambios químicos y físicos, alteran favorablemente su estructura y propiedades, lo que permite la especificidad de los tratamientos médicos. Los materiales compuestos a partir de proteínas y polisacáridos presentan muchas oportunidades para mejorar las funciones biológicas y las funciones tecnológicas contemporáneas. Las aplicaciones actuales que implican la replicación de tejidos artificiales en la regeneración de tejidos, la terapia de heridas, los sistemas eficaces de administración de fármacos y los coloides alimentarios se han beneficiado de los materiales compuestos de proteína y polisacárido. Aunque existe una investigación limitada sobre el desarrollo de compuestos de proteína y polisacárido, los estudios han demostrado su eficacia y ventajas en múltiples campos (Bealer y col., 2020).

Investigaciones recientes demuestran los posibles estudios de los biopolímeros como materiales para la producción de dispositivos con fines médicos (Wróblewska-Krepsztul y col., 2019). Las características más adecuadas para sugerir estos biomateriales son peso molecular, lubricidad, química del material, absorción de agua, degradación, forma y estructura, solubilidad (Ferraris y col., 2020), hidrofilia/hidrofobicidad (Dhandayuthapani y col., 2011), mecanismo de erosión (Ogueri y col., 2019) y energía superficial (Bhatia, 2016).

### **Aplicaciones en el sector ingenieril**

En el año 2020, se reportaron la adición de los biopolímeros la goma guar y la goma de xantana, las cuales han sido aprovechados como compuestos co-estabilizadores para sustituir el estabilizador presente en el cemento, esto proporciona un impacto positivo a las propiedades mecánicas y térmicas del material, además este tipo de compuestos poseen la capacidad de ser reciclados causando un impacto ambiental mínimo (Nagaraj y Muguda, 2020). Por lo que son potenciales sustitutos de los



estabilizadores comúnmente utilizados en materiales de construcción (George y col., 2020).

## **Aspectos importantes para el empleo de los biopolímeros**

Debido a sus propiedades especiales y ventajas ambientales, los biopolímeros lentamente han comenzado a reemplazar los materiales convencionalmente utilizados. Mientras que al principio se utilizaron principalmente en la industria alimentaria, su aplicación en otras industrias relacionadas tuvo lugar relativamente rápido.

En el sector farmacéutico, inicialmente se usaron para el mismo propósito que en la industria alimentaria, que es como agentes de engrosamiento y emulsionantes, moléculas de huéspedes, agentes de volumen o fibras, además, su uso en cosméticos ha aumentado sustancialmente. Según los datos existentes, se estima que el mercado mundial de biopolímeros alcanzará aproximadamente USD 10 mil millones para fines de 2021, un aumento en aproximadamente un 17% entre 2017 y 2021. El mercado más grande es propiedad de Europa occidental con aproximadamente el 41.5% del mercado global (Martău y col., 2019). En biomedicina, los polímeros se han utilizado con éxito tanto experimentalmente como en aplicaciones *in vivo*, aderezo para heridas, ingeniería de tejidos, administración de medicamentos o dispositivos médicos como electrónica, sensores y baterías. Además, debido a sus propiedades físicas, térmicas, mecánicas y ópticas, los biopolímeros son materiales ideales ampliamente utilizados para alimentos y aplicaciones farmacéuticas (Udayakumar y col., 2021).

La concentración y la matriz de biopolímeros se pueden manipular con el fin de alcanzar las propiedades funcionales apropiadas, como la microestructura, la permeabilidad y la cargabilidad que dependen de la estructura interna del polímero. Según estas propiedades, los biopolímeros se utilizan con éxito para obtener nanopartículas, nano emulsiones, nano geles o hidrogeles con aplicaciones en la



biomedicina como sistemas portadores como aplicadores de ingredientes activos en películas permeables en la cicatrización de heridas. Entre ellos, los polisacáridos son los más utilizados, ya sea individualmente o en mezclas con otros biopolímeros para reemplazar los materiales sintéticos o existir en la adición a ellos (Kalia y col., 2019).

La celulosa, un polímero natural, es el polisacárido más abundante y renovable. La celulosa se ha utilizado como microcápsula inmunoprotectora porque no forma hidrogel y se aplica principalmente en cámaras de difusión inertes. Como agente encapsulante, es beneficiosa para las células epiteliales citotóxicas en el tratamiento del cáncer de páncreas, líneas celulares productoras de insulina (HIT-T15), células renales embrionarias y células de hibridoma. Es reconocida la celulosa como un nuevo nano vehículo para el tratamiento del cáncer colorrectal debido a su alto contenido de componentes farmacéuticos, su liberación a un pH neutro en comparación con un pH ácido, siendo propuesto como un sistema de administración oral seguro para el tratamiento controlado del cáncer de colon (Pooresmaeil y Namazi, 2019).

La celulosa es la parte estructural de la pared celular de las plantas verdes y algas, forma parte del grupo de los polisacáridos y está compuesta por una cadena lineal de unidades de D-glucosa unidas. Teniendo en cuenta que tiene un carácter anfifílico, puede usarse como surfactante y/o estabilizador en la interfase agua-aceite en emulsiones de decapado. La celulosa es un polisacárido insoluble en agua y en la mayoría de los disolventes orgánicos. Algunos derivados de la celulosa, por ejemplo, la carboximetilcelulosa (CMC), contiene grupos funcionales enlazados a los grupos OH<sup>-</sup> en la estructura de la celulosa. Lo que convierte a este compuesto como una opción viable en el aprovechamiento como sustituto en la elaboración de productos sustentables (Li y col., 2017).

## Conclusiones

Estos tipos de compuestos pueden tener diferentes aplicaciones en diversos ramos de la industria como la farmacéutica, alimenticia, cosmética, eléctrica, ambiental y en la producción de nuevos materiales. En la actualidad se están examinando diversos biopolímeros, tales como los polisacáridos, terpenos, quitosano, celulosa, colágeno, la goma xantana, la goma arábiga, la seda, entre otros; los cuales se ha comprobado que son una opción viable en la sustitución de diversos materiales que provienen de una fuente no renovable y el que son más benéficos para su entorno (medio ambiente).

## Observaciones

Los autores declaran no conflicto de intereses en el presente manuscrito.

## Agradecimientos

Este trabajo agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para el estudiante de doctorado VACT, a la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Coahuila por el acceso a la información para realizar esta revisión, así como al Cuerpo Académico de Ingeniería y Simulación de Proceso Químico por el apoyo otorgado para la redacción de este manuscrito.

## Literatura Citada

Alvés, M. H., Sfeir, H., Tranchant, J. F., Gombart, E., Sagorin, G., Caillol, S., & Save, M. (2014). Terpene and dextran renewable resources for the synthesis of amphiphilic biopolymers. *Biomacromolecules*. 15(1): 242-251.

Bealer, E. J., Onissema-Karimu, S., Rivera-Galletti, A., Francis, M., Wilkowski, J., Salas-de la Cruz, D., & Hu, X. (2020). Protein–polysaccharide composite materials: Fabrication and applications. *Polymers*. 12(2): 464.

Bhatia, S. (2016). Plant derived polymers, properties, modification & applications. In *Natural polymer drug delivery systems* (pp. 119-184). Springer, Cham.

Bolton, J. M., Hillmyer, M. A., & Hoye, T. R. (2014). Sustainable thermoplastic elastomers from terpene-derived monomers. *ACS Macro Letters*. 3(8): 717-720.

Chen, S., Han, Y., Yang, M., Zhu, X., Liu, C., Liu, H., & Zou, H. (2020). Hydrophobically modified water-based polymer for slow-release urea formulation. *Progress in Organic Coatings*. 149: 105964.

Dhandayuthapani, B., Yoshida, Y., Maekawa, T., & Kumar, D. S. (2011). Polymeric scaffolds in tissue engineering application: a review. *International journal of polymer science*. 2011.

Durand, A., Marie, E., Rotureau, E., Leonard, M., & Dellacherie, E. (2004). Amphiphilic polysaccharides: useful tools for the preparation of nanoparticles with controlled surface characteristics. *Langmuir*. 20(16): 6956-6963.

Easterling, C. P., Kubo, T., Orr, Z. M., Fanucci, G. E., & Sumerlin, B. S. (2017). Synthetic upcycling of polyacrylates through organocatalyzed post-polymerization modification. *Chemical science*. 8(11): 7705-7709.

Ferraris, S., Spriano, S., Scalia, A. C., Cochis, A., Rimondini, L., Cruz-Maya, I., & Vineis, C. (2020). Topographical and biomechanical guidance of electrospun fibers for biomedical applications. *Polymers*. 12(12): 2896.

Figueiredo, J. A., Ismael, M. I., Anjo, C. M. S., & Duarte, A. P. (2010). Cellulose and derivatives from wood and fibers as renewable sources of raw-materials. *Carbohydrates in Sustainable Development*. I: 117-128.

Firdaus, M., Montero de Espinosa, L., & Meier, M. A. (2011). Terpene-based renewable monomers and polymers via thiol–ene additions. *Macromolecules*. 44(18): 7253-7262.

Garcia, J. M., & Robertson, M. L. (2017). The future of plastics recycling. *Science*. 358(6365): 870-872.

George, A., Sanjay, M. R., Srisuk, R., Parameswaranpillai, J., & Siengchin, S. (2020). A comprehensive review on chemical properties and applications of biopolymers and their composites. *International journal of biological macromolecules*. 154: 329-338.

Honarkar, H., & Barikani, M. (2009). Applications of biopolymers I: chitosan. *Monatshefte Für Chemie-Chemical Monthly*. 140(12): 1403–1420.

Hurtado, A., Selgas, R., & Aroca, Á. S. (2020). El alginato y sus inmensas aplicaciones industriales. *Nereis. Interdisciplinary Ibero-American Journal of Methods, Modelling and Simulation*. 12: 137-149

Joye, I. J. (2019). Cereal biopolymers for nano-and microtechnology: A myriad of opportunities for novel (functional) food applications. *Trends in Food Science & Technology*. 83: 1-11.

Kalia, V. C., Ray, S., Patel, S. K., Singh, M., & Singh, G. P. (2019). The dawn of novel biotechnological applications of polyhydroxyalkanoates. In *Biotechnological applications of polyhydroxyalkanoates* (pp. 1-11). Singapore: Springer.

Lahaye, M., & Robic, A. (2007). Structure and functional properties of ulvan, a polysaccharide from green seaweeds. *Biomacromolecules*. 8(6): 1765-1774.

Li, Y., Yu, S., Chen, P., Rojas, R., Hajian, A., & Berglund, L. (2017). Cellulose nanofibers enable paraffin encapsulation and the formation of stable thermal regulation nanocomposites. *Nano Energy*. 34: 541-548.

Liu, H., & Chung, H. (2017). Visible-light induced thiol–ene reaction on natural lignin. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 5(10): 9160-9168.

Luo, Y., Wang, Q., & Zhang, Y. (2020). Biopolymer-based nanotechnology approaches to deliver bioactive compounds for food applications: a perspective on the past, present, and future. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 68(46): 12993-13000.

Majee, S. B., Avlani, D., & Biswas, G. R. (2017). Pharmacological, pharmaceutical, cosmetic and diagnostic applications of sulfated polysaccharides from marine algae and bacteria. *African Journal of Pharmacy and Pharmacology*. 11(5): 68-77.

Martău, G. A., Mihai, M., & Vodnar, D. C. (2019). The use of chitosan, alginate, and pectin in the biomedical and food sector—biocompatibility, bioadhesiveness, and biodegradability. *Polymers*. 11(11): 1837.

Mellinas, C., Ramos, M., Jiménez, A., & Garrigós, M. C. (2020). Recent trends in the use of pectin from agro-waste residues as a natural-based biopolymer for food packaging applications. *Materials*. 13(3): 673.

Moradali, M. F., & Rehm, B. H. (2020). Bacterial biopolymers: from pathogenesis to advanced materials. *Nature Reviews Microbiology*. 18(4): 195-210.

Nagaraj, H.B., Muguda, S. (2020). Recent Innovations in Stabilized Earthen Construction. In: Delgado, J. (eds) Sustainable Materials in Building Construction. Building Pathology and Rehabilitation, Vol. 11: Springer, Cham.

Ogueri, K. S., Jafari, T., Escobar Ivirico, J. L., & Laurencin, C. T. (2019). Polymeric biomaterials for scaffold-based bone regenerative engineering. *Regenerative Engineering and Translational Medicine*. 5(2): 128-154.

Onwukamike, K. N., Grelier, S., Grau, E., Cramail, H., & Meier, M. A. (2018). Sustainable transesterification of cellulose with high oleic sunflower oil in a DBU-CO<sub>2</sub> switchable solvent. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 6(7): 8826-8835.

Pooresmaeil, M., Nia, S. B., & Namazi, H. (2019). Green encapsulation of LDH (Zn/Al)-5-Fu with carboxymethyl cellulose biopolymer; new nanovehicle for oral colorectal cancer treatment. *International Journal of Biological Macromolecules*. 139: 994-1001.

Rahimi, A., & García, J. M. (2017). Chemical recycling of waste plastics for new materials production. *Nature Reviews Chemistry*. 1(6): 1-11.

Reddy, N., & Yang, Y. (2009). Preparation and properties of starch acetate fibers for potential tissue engineering applications. *Biotechnology and Bioengineering*. 103(5): 1016-1022.

Ren, S., Trevino, E., & Dubé, M. A. (2015). Copolymerization of Limonene with n-Butyl Acrylate. *Macromolecular Reaction Engineering*. 9(4): 339-349.

Ren, S., Zhang, L., & Dubé, M. A. (2015). Free-radical terpolymerization of n-butyl acrylate/butyl methacrylate/d-limonene. *Journal of Applied Polymer Science*. 132(47): 42821.

Rose, M., & Palkovits, R. (2011). Cellulose-Based Sustainable Polymers: State of the Art and Future Trends. *Macromolecular Rapid Communications*. 32(17): 1299-1311.

Sahana, T. G., & Rekha, P. D. (2018). Biopolymers: Applications in wound healing and skin tissue engineering. *Molecular Biology Reports*. 45(6): 2857–2867.

Samadian, H., Maleki, H., Allahyari, Z., & Jaymand, M. (2020). Natural polymers-based light-induced hydrogels: Promising biomaterials for biomedical applications. *Coordination Chemistry Reviews*. 420: 213432.

Samrot, A. V., Sean, T. C., Kudaiyappan, T., Bisjarah, U., Mirarmandi, A., Faradjeva, E., ... & Kumar, S. S. (2020). Production, characterization and application of nanocarriers made of polysaccharides, proteins, bio-polyesters and other



biopolymers: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 165: 3088-3105.

Silvestre, A. J., & Gandini, A. (2008). Terpenes: major sources, properties and applications. *In Monomers, polymers and composites from renewable resources* (pp. 17-38). Elsevier.

Singh, V., Kumar, P., & Sanghi, R. (2012). Use of microwave irradiation in the grafting modification of the polysaccharides—A review. *Progress in Polymer Science*. 37(2): 340-364.

Sivakanthan, S., Rajendran, S., Gamage, A., Madhujith, T., & Mani, S. (2020). Antioxidant and antimicrobial applications of biopolymers: A review. *Food Research International*. 136: 109327.

Söyler, Z., & Meier, M. A. (2017). Catalytic transesterification of starch with plant oils: a sustainable and efficient route to fatty acid starch esters. *ChemSusChem*. 10(1): 182-188.

Stevens, C. V., Meriggi, A., & Booten, K. (2001). Chemical modification of inulin, a valuable renewable resource, and its industrial applications. *Biomacromolecules*. 2(1): 1-16.

Thambi, T., Phan, V. G., & Lee, D. S. (2016). Stimuli-sensitive injectable hydrogels based on polysaccharides and their biomedical applications. *Macromolecular rapid communications*. 37(23): 1881-1896.

Udayakumar, G. P., Muthusamy, S., Selvaganesh, B., Sivarajasekar, N., Rambabu, K., Banat, F., & Show, P. L. (2021). Biopolymers and composites: Properties, characterization and their applications in food, medical and pharmaceutical industries. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 9(4): 105322.



Vanmarcke, A., Leroy, L., Stoclet, G., Duchatel-Crépy, L., Lefebvre, J. M., Joly, N., & Gaucher, V. (2017). Influence of fatty chain length and starch composition on structure and properties of fully substituted fatty acid starch esters. *Carbohydrate Polymers*. 164: 249-257.

Wang, X. L., Huang, Y., Zhu, J., Pan, Y. B., He, R., & Wang, Y. Z. (2009). Chitosan-graft poly (p-dioxanone) copolymers: preparation, characterization, and properties. *Carbohydrate Research*. 344(6): 801-807.

Wilbon, P. A., Chu, F., & Tang, C. (2013). Progress in renewable polymers from natural terpenes, terpenoids, and rosin. *Macromolecular rapid communications*. 34(1): 8-37.

Winkler, H., Vorwerg, W., & Wetzel, H. (2013). Synthesis and properties of fatty acid starch esters. *Carbohydrate Polymers*. 98(1): 208-216.

Wróblewska-Krepsztul, J., Rydzkowski, T., Michalska-Požoga, I., & Thakur, V. K. (2019). Biopolymers for biomedical and pharmaceutical applications: recent advances and overview of alginate electrospinning. *Nanomaterials*. 9(3): 404.

Xia, S., Zhang, L., Davletshin, A., Li, Z., You, J., & Tan, S. (2020). Application of polysaccharide biopolymer in petroleum recovery. *Polymers*. 12(9): 1860.

Yao, K., & Tang, C. (2013). Controlled polymerization of next-generation renewable monomers and beyond. *Macromolecules*. 46(5): 1689-1712.

Zhang, Y., & Dube, M. A. (2014). Copolymerization of n-Butyl Methacrylate and d-Limonene. *Macromolecular Reaction Engineering*. 8(12): 805-812.

Zhang, Y., Gan, T., Hu, H., Huang, Z., Huang, A., Zhu, Y., & Yang, M. (2014). A green technology for the preparation of high fatty acid starch esters: Solid-phase synthesis of starch laurate assisted by mechanical activation with stirring ball mill as reactor. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 53(6): 2114-2120.

Zhao, J., Schlaad, H. (2011). Synthesis of Terpene-Based Polymers. In: Schlaad, H. (Eds.) *Bio-synthetic Polymer Conjugates*. Advances in Polymer Science, Vol. 253: (pp. 151-190). Berlin, Heidelberg: Springer.

Zhao, J., Hadjichristidis, N., & Schlaad, H. (2015). Polymerization using phosphazene bases. In *Anionic Polymerization* (pp. 429-449). Tokyo: Springer.

Zhou, C., So, P. S., & Chen, X. W. (2020). A water retention model considering biopolymer-soil interactions. *Journal of Hydrology*. 586: 124874.