

Polímeros naturales para la elaboración de películas y recubrimientos comestibles.

Natural Polymers to Produce Edible Films and Coatings.

*David Betancur-Ancona
Irving Sosa-Crespo
Luis Chel-Guerrero
Wilbert Rodríguez-Canto^{18,19}*

Resumen

Los polímeros son moléculas esenciales presentes en el entorno los cuales se pueden dividir en sintéticos y naturales. Aunque los polímeros sintéticos revolucionaron la industria, su lenta degradación y acumulación generan preocupación ambiental, especialmente por su abundancia y utilización en los empaques de alimentos. Esto impulsa los esfuerzos hacia la búsqueda de polímeros naturales como proteínas y polisacáridos que por su naturaleza pueden considerarse una alternativa sostenible. Estos ofrecen biodegradabilidad y pueden ser comestibles, pudiendo ser usados como empaques y recubrimientos de alimentos por las propiedades que poseen. Se pueden obtener de varias fuentes tanto vegetales como animales y, su potencial es enorme, ya que existen estudios prometedores para su obtención, caracterización y aplicación de estos polímeros naturales que abren camino hacia soluciones de

18 Cuerpo Académico de Desarrollo Alimentario. Facultad de Ingeniería Química. Universidad Autónoma de Yucatán.

19 Autor para correspondencia: wiler88@gmail.com



empaque más ecológicas y seguras para la industria alimentaria.

Palabras clave: Empaques de alimentos, productos biodegradables, polisacáridos, proteínas.

Abstract

Polymers are essential molecules present in the environment which can be divided into synthetic and natural. Although synthetic polymers revolutionized the industry, their slow degradation and accumulation generate environmental concern, especially due to their abundance and use in food packaging. This drives efforts toward the search for natural polymers such as proteins and polysaccharides that, by their nature, can be considered a sustainable alternative. These offer biodegradability and can be edible, being able to be used as food packaging and coatings due to the properties they possess. They can be obtained from various sources, both vegetable and animal, and their potential is enormous, since there are promising studies for their obtention, characterization and application of these natural polymers that pave the way towards more ecological and safe packaging solutions for the food industry.

Keywords: Food packaging, biodegradable products, polysaccharides, proteins.

Introducción

Los polímeros han estado presentes en la Tierra desde la aparición de los primeros organismos. Hoy en día, al oír la palabra "polímero", solemos asociarla a productos derivados del desarrollo tecnológico humano, como el polietileno (PE) y polipropileno (PP) de las bolsas o el tereftalato de polietileno (PET) de las botellas de plástico. También existen polímeros sintéticos más complejos con nombres menos familiares, como el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), utilizado en la industria automotriz. Sin embargo, la naturaleza también ofrece una amplia gama de polímeros, como la celulosa, la quitina, el almidón (compuesto de amilosa y amilopectina), los galactomananos, los alginatos, la miosina, la actina y las albúminas, entre otros. Estos polímeros, generados por los seres vivos, se conocen como polímeros naturales. Pero ¿qué es exactamente un polímero? El término proviene de las raíces griegas

"poli" (muchos) y "meros" (partes), lo que da una idea sobre su estructura esencial. Los polímeros son macromoléculas formadas por la unión repetitiva de unidades más pequeñas llamadas monómeros, que se unen mediante enlaces químicos covalentes (compartiendo electrones). Las propiedades de un polímero dependen del tipo de monómeros que lo componen, así como de la secuencia y disposición en que estos se encuentran a lo largo de la cadena (1). Como se mencionó previamente, los polímeros sintéticos son creados por el ser humano a través de diversas reacciones químicas, utilizando una gran variedad de compuestos como monómeros. Los polímeros naturales, en cambio, son producidos por los organismos vivos mediante complejas rutas bioquímicas.

Historia y evolución de los polímeros

Entre los principales grupos de polímeros naturales se encuentran los ácidos nucleicos, los polisacáridos y las proteínas. El profesor Robert Burford (2) clasificó la historia de los polímeros en tres etapas. La primera etapa se remonta a la prehistoria, con la explotación humana de polímeros naturales como la leña y fibras como la lana. Más recientemente, encontramos el uso del caucho en Mesoamérica. A principios del siglo XIX, se lograron avances en la síntesis de polímeros en el laboratorio. La segunda etapa se caracterizó por la síntesis de polímeros a partir de moléculas más pequeñas derivadas del petróleo o el carbón. Se descubrió la baquelita y se inició la producción masiva de polímeros sintéticos, también conocidos como plásticos, como el PE y el PP. Estos materiales, más económicos y con propiedades mejoradas, reemplazaron a los clásicos como fibras naturales, cuero y vidrio. Otro avance clave en esta etapa fue el uso de catalizadores, que aumentaron la eficiencia y especificidad de los procesos de síntesis. El siglo XX se conoce, por tanto, como la "era del plástico". Sin embargo, en el siglo XXI, el crecimiento poblacional y la consecuente demanda de plásticos han generado un grave problema de acumulación de residuos.

La percepción social hacia los polímeros sintéticos se ha vuelto negativa, impulsando un creciente interés en el uso de polímeros naturales. Esta tendencia marca el inicio de la tercera etapa, ya que la acumulación de residuos plásticos se ve agravada por su corta vida útil y su largo tiempo de degradación, que puede oscilar entre 100 y 1000



años. Se estima que entre 1950 y 2015 se generaron 6300 millones de toneladas de residuos plásticos, y solo en 2016 se produjeron 242 millones de toneladas. Se proyecta que para 2035 la cantidad de plástico en los océanos igualará a la de peces (3). Los plásticos utilizados en embalaje representan el 40% del total de residuos, y en el año 2007, un 41% de estos se destinó al embalaje de alimentos (4). Actualmente, se buscan polímeros naturales que puedan sustituir a los sintéticos, centrándose en desarrollar procesos para que igualen o superen las propiedades de los sintéticos, permitiendo la creación de productos no tóxicos y respetuosos con el medio ambiente. Un estudio bibliométrico de 2022 (5) evidencia el creciente interés en este campo, mostrando un aumento exponencial en los estudios sobre biopolímeros naturales desde el año 2000 (Figura 1).

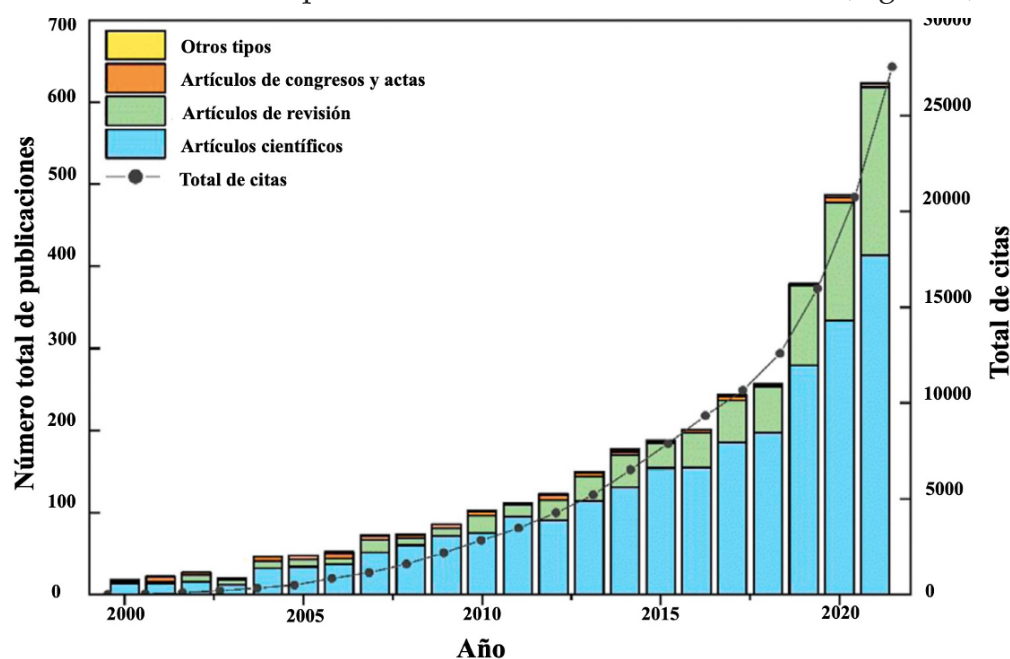


Figura 1. Publicaciones científicas y citas en el periodo 2000-2022 sobre polímeros naturales en la base de datos Web of Science (5).

Características de los materiales de empaque y recubrimiento de alimentos

Entre las funciones principales de los empaques de alimentos se encuentra la protección de los productos contra condiciones externas, actuando como una barrera frente a agentes patógenos, la humedad,

el oxígeno y daños físicos durante su distribución y almacenamiento. Por lo tanto, los materiales empleados deben poseer las propiedades adecuadas para regular el paso de ciertos gases, así como las propiedades mecánicas necesarias para garantizar su integridad y preservar la calidad del producto (Figura 2). El oxígeno es uno de los gases clave a considerar, ya que las propiedades de barrera requeridas dependerán del tipo de producto y las condiciones de almacenamiento deseadas. Por ejemplo, algunos vegetales como manzanas, aguacates y plátanos son climatéricos, lo que significa que, como parte de su proceso de maduración, “continúan respirando oxígeno” después de ser cosechados. Reducir la disponibilidad de oxígeno puede ralentizar este proceso, pero un ambiente completamente sin oxígeno puede provocar la fermentación del producto (6). Por otra parte, la presencia de oxígeno puede generar sabores indeseados en productos con alto contenido de grasa, debido a la reacción de oxidación. Asimismo, es crucial controlar el paso de vapor de agua a través del empaque. Una barrera deficiente contra la humedad puede favorecer el crecimiento microbiano al aumentar la cantidad de agua disponible en el producto. El polietileno y el polipropileno son los polímeros sintéticos más utilizados en el envasado de alimentos, ya que forman películas delgadas con buenas propiedades mecánicas y actúan como una barrera efectiva contra el vapor de agua, aunque no tanto contra el oxígeno (7).



Figura 2. Propiedades requeridas de una película o recubrimiento para proteger un alimento.



Por otro lado, ciertos polímeros naturales, como algunos polisacáridos y proteínas, pueden generar películas con buenas propiedades mecánicas y una excelente barrera contra el oxígeno. En general, las películas de empaque deben ser flexibles y resistentes. Sin embargo, muchos polímeros se vuelven quebradizos y rígidos al procesarse en capas delgadas, lo que requiere la adición de plastificantes durante su fabricación para mejorar su flexibilidad. Además de los empaques tradicionales, los alimentos también pueden protegerse mediante recubrimientos comestibles. Estos son películas muy finas, elaboradas con polímeros naturales como proteínas y polisacáridos, que se aplican directamente sobre el producto. Los recubrimientos comestibles no solo protegen el alimento y regulan el intercambio de gases, sino que también pueden ser consumidos sin riesgos para la salud (8).

Estructura de los polisacáridos y las proteínas

Las proteínas son polímeros complejos que representan aproximadamente el 50% del peso seco de las células. Están formadas por la unión covalente de aminoácidos mediante enlaces peptídicos. Estos aminoácidos, los monómeros que componen la cadena proteica, son 20 diferentes en la naturaleza. Las propiedades de las proteínas están directamente relacionadas con su estructura, que se clasifica en cuatro niveles: I) Estructura primaria, consiste en la secuencia lineal de aminoácidos. II) Estructura secundaria, describe la relación conformacional local entre los aminoácidos, que pueden adoptar formas de hélices alfa (α) o láminas beta (β) plegadas. III) Estructura terciaria, determina la estructura tridimensional global de la proteína, resultado del plegamiento de sus cadenas. Puede ser globular o fibrilar, y es crucial para la función que desempeña la proteína, ya sea como hormona, enzima, elemento estructural, etc. IV) Estructura cuaternaria, se obtiene por la unión de varias cadenas proteicas o polipéptidos mediante enlaces no covalentes (9).

Los polisacáridos son polímeros naturales abundantes en la naturaleza, presentes en fuentes renovables como algas, plantas, animales y microorganismos. Desempeñan funciones cruciales en la estructura de los seres vivos, en diversos procesos bioquímicos y

como reserva de energía. Están compuestos por unidades estructurales repetitivas llamadas monosacáridos, que son sus monómeros. Estos se unen mediante enlaces covalentes conocidos como enlaces glicosídicos, formando la cadena principal del polisacárido. Dependiendo de si el polisacárido está formado por un solo tipo de monosacárido o varios, se clasifica como homopolisacárido o heteropolisacárido, respectivamente. La glucosa es el monosacárido más común en los polisacáridos, aunque también se encuentran fructosa, galactosa, manosa, arabinosa, xilosa y derivados de algunos monosacáridos (10).

El uso de proteínas y polisacáridos como películas y recubrimientos comestibles

Las proteínas y los polisacáridos son los polímeros naturales más investigados para la elaboración de películas y recubrimientos comestibles destinados a la protección de alimentos. Además de ser biodegradables e incluso comestibles, pueden presentar propiedades adecuadas para actuar como barreras protectoras.

Proteínas. Algunos estudios señalan que las películas a base de proteínas tienen mejores propiedades mecánicas que las de polisacáridos, siendo más flexibles. Sin embargo, presentan una menor barrera contra el vapor de agua y son más frágiles que las películas obtenidas a partir de polímeros sintéticos (11). Al igual que estas últimas, suelen requerir la adición de aditivos plastificantes, como glicerol, manitol y xilitol. Un estudio de mercado estima que el valor del mercado global de películas de proteínas fue de 1.91 mil millones de dólares en 2021, con una proyección de 2.21 mil millones para 2028. Entre las proteínas más utilizadas se encuentran las zeínas del maíz, el colágeno, la caseína, la soya y el trigo (12). La leche de vaca es una fuente de proteínas, con aproximadamente 33 g de proteína por litro, de las cuales el 80% es caseína. Al separar las caseínas de la leche (por precipitación al acidificarla), la dispersión restante se conoce como concentrado de proteína de suero de leche, que contiene varios tipos de proteínas. Dependiendo de la sustancia utilizada para neutralizar la solución de caseína, se puede obtener caseinato de sodio o de calcio. Las películas de caseinato de calcio ofrecen una mejor barrera contra los gases, ya que el calcio permite que las cadenas de proteínas

se unan, creando una estructura más compacta, aunque esto también las hace más rígidas. Por otro lado, las películas de caseinato de sodio son transparentes y flexibles. Cuando el concentrado de proteína de suero de leche se purifica hasta alcanzar una concentración de proteína de al menos el 90%, se denomina aislado proteico de suero de leche. Las películas obtenidas a partir de este aislado presentan mejores propiedades mecánicas y de barrera contra el oxígeno (11). La Figura 3 muestra películas elaboradas con caseína y dos aislados proteicos de suero de leche comerciales. En este estudio (13), se observó que las películas del aislado eran más transparentes y resistentes que las de caseína, pero menos elásticas. También se aplicaron estas películas sobre fresas para observar su efecto en el cambio de color (Figura 3c).

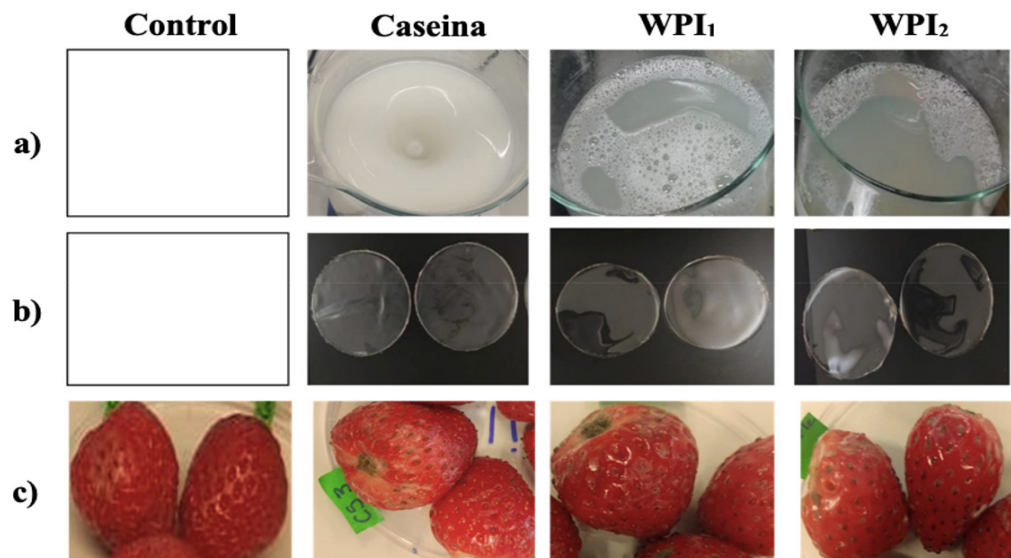


Figura 3. Elaboración de películas con caseína y dos aislados proteicos de suero de leche comerciales (WPI1 y WPI2). a) soluciones formadoras de películas, b) películas obtenidas, c) aplicación como recubrimiento sobre fresas (12).

Otra proteína empleada en la elaboración de películas comestibles es el colágeno. Este se caracteriza por una estructura compuesta de tres cadenas paralelas en forma de hélices alfa (α), constituidas principalmente por los aminoácidos glicina, prolina e hidroxiprolina. El colágeno es la proteína más abundante en la matriz extracelular de los

vertebrados, representando aproximadamente el 30% del peso total de las proteínas del cuerpo, por lo que puede obtenerse de subproductos de la industria ganadera. Las películas elaboradas con colágeno poseen propiedades mecánicas que les permiten estirarse y contraerse, adaptándose a la compresión y expansión durante el procesamiento de embutidos cárnicos. Por ello, se utilizan en la producción de salchichas, salami, botanas y otros productos similares. La gelatina, un derivado del colágeno, se obtiene mediante la ruptura de las cadenas de colágeno a través de un proceso ácido, básico o enzimático. La gelatina puede formar películas que protegen los productos del secado o la exposición al oxígeno y la luz. Sin embargo, al entrar en contacto con productos ricos en agua, la película puede hincharse y solubilizarse, lo que limita su aplicación (14). También es posible obtener proteínas de fuentes vegetales para la elaboración de películas y recubrimientos comestibles. Las principales fuentes son los cereales y las semillas de leguminosas. Entre los cereales, destaca la zeína del maíz, que representa el 80% de su proteína. Gracias a su carácter hidrofóbico, la zeína posee propiedades adecuadas para la formación de películas que actúan como barrera contra gases como el O₂ y el vapor de agua. Sin embargo, las películas resultantes son quebradizas y frágiles, por lo que se requiere el uso de aditivos plastificantes como el glicerol y el sorbitol. Las glutelinas, obtenidas del trigo, constituyen aproximadamente el 80% de las proteínas de este cereal. Al hidratarse con agua, forman una solución viscosa que permite elaborar películas con una excelente permeabilidad selectiva entre el CO₂ y el O₂, además de adecuadas propiedades mecánicas. El principal inconveniente de estas películas es que un porcentaje de la población es alérgica a esta proteína, lo que puede provocar reacciones adversas para su salud.

Polisacáridos. Las películas y recubrimientos elaborados con polisacáridos suelen presentar una alta barrera al paso del oxígeno y los aromas, además de ser películas mecánicamente resistentes. Sin embargo, debido a su naturaleza hidrofílica, no son resistentes en condiciones de alta humedad. Actualmente, se estudia la incorporación de sustancias hidrofóbicas, como aceites, o el entrecruzamiento de las cadenas de polisacáridos para superar esta limitante. Entre los polisacáridos más



utilizados para la elaboración de películas se encuentran el almidón, la celulosa, la pectina, el pululano, el alginato y el quitosano. Otro tipo de polisacáridos que están siendo evaluados por el tipo de películas que forman son los galactomananos. Estos tienen una estructura lineal de unidades de manosa unidas por enlaces glicosídicos, y a intervalos regulares, una galactosa se ramifica hacia afuera de la cadena principal. Los galactomananos se diferencian por la longitud de su cadena, la relación entre el contenido de manosa y galactosa, y la periodicidad con la que aparecen las galactosas en la cadena. Las principales fuentes de galactomanano utilizadas en la industria alimentaria como espesantes y estabilizantes son la goma guar, la goma tara y la goma de algarrobo, con una relación manosa:galactosa de 2:1, 3:1 y 3.5:1, respectivamente (15). El Cuerpo Académico de Desarrollo Alimentario (CADA) de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de Yucatán, ha realizado estudios sobre el aprovechamiento de fuentes no convencionales para la obtención de polímeros naturales destinados a la industria alimentaria. Uno de los trabajos se enfocó en la obtención, caracterización y modificación de un galactomanano extraído de la semilla del árbol de flamboyán (*Delonix regia*), así como en la elaboración de películas comestibles a partir de este. Entre los hallazgos más destacados, se encuentra la caracterización del galactomanano del Flamboyán (*Delonix regia*), que presenta una relación manosa:galactosa de 3.5:1 y una estructura amorfa. Además, se demostró que mediante una hidrólisis enzimática controlada es posible reducir el tamaño de las cadenas del polímero (16), lo que disminuye su viscosidad en solución acuosa sin comprometer las propiedades mecánicas de las películas obtenidas, ya que esto facilita el proceso de elaboración de estas. A diferencia de la mayoría de las películas de polisacáridos, las elaboradas con el galactomanano del *Delonix regia* no requirieron la adición de plastificantes, ya que resultan ser flexibles y resistentes por sí mismas (17). Por otro lado, el almidón es el polisacárido más adecuado y abundante para la producción de recubrimientos y películas, además de ser renovable y de bajo costo. Las fuentes más comunes para su obtención son el maíz, el trigo, la papa y el arroz. El gránulo de almidón está compuesto por dos polisacáridos: la amilosa y la amilopectina. Ambos están formados por unidades de glucosa, pero difieren en su

estructura: la amilosa es una cadena lineal, mientras que la amilopectina es altamente ramificada. El gránulo de almidón presenta una zona cristalina, principalmente debida a la amilopectina, y una zona amorfa (sin patrones repetitivos como en la cristalina) de amilosa. La relación entre amilosa y amilopectina varía según la fuente del almidón, lo que influye en las propiedades tanto del almidón como de las películas elaboradas con él. Los valores típicos de amilosa son del 25%, pero pueden oscilar entre 0% y 75% (18). Entre los estudios desarrollados por el CADA, destaca la caracterización nutricional de las proteínas de un maíz QPM (de alta calidad proteica) adaptado a las condiciones de suelo y clima de la península de Yucatán, denominado Sac Beh (19). Durante el proceso de obtención de esta proteína de alta calidad, se obtiene almidón como subproducto. Para aprovecharlo, se elaboraron películas comestibles mezclando el almidón de Sac Beh con el galactomanano del *Delonix regia*, además de incorporar vainillina, un compuesto natural antioxidante (20). Se obtuvieron películas con propiedades mecánicas adecuadas sin necesidad de utilizar plastificantes y esta mezcla se aplicó sobre peras de la variedad D'Anjou, conocidas por su rápida maduración debido a su alta tasa de respiración. Como se observa en la Figura 4, el recubrimiento retrasó la maduración de las peras, manteniendo una apariencia deseable para el consumidor incluso después de 24 días a temperatura ambiente. En contraste, las peras sin recubrimiento comenzaron a mostrar zonas oscuras a partir del día 8. Esto sugiere que el recubrimiento logró reducir la velocidad de respiración de las peras al disminuir el oxígeno disponible para el proceso de maduración.

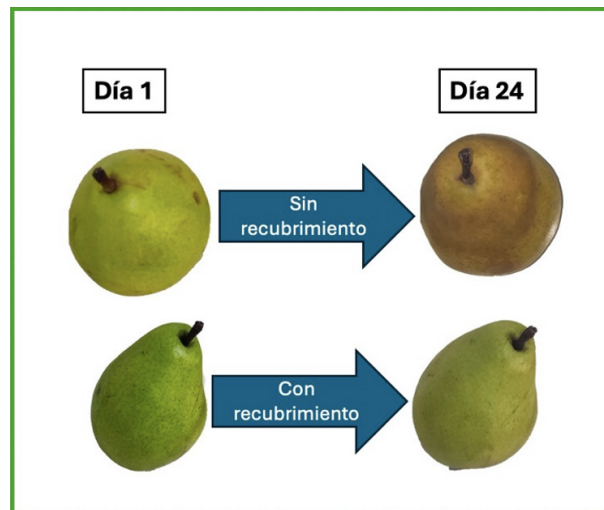


Figura 4. Aplicación de un recubrimiento elaborado con la mezcla de almidón de maíz QPM Sac Beh, galactomanano de *Delonix regia* y vainillina sobre peras D'Anjou.

Conclusiones

En la actualidad, los polímeros sintéticos continúan siendo los materiales predominantes en la fabricación de empaques para la industria alimentaria. Sin embargo, desde comienzos del siglo XXI se está trabajando en la utilización de polímeros naturales para disminuir el impacto de los residuos generados por los materiales sintéticos. Existe aún un amplio campo por explorar e investigar para la obtención de polímeros naturales de diferentes fuentes y para superar obstáculos como la sensibilidad de estas películas a ambientes con alto contenido de humedad. Asimismo, es crucial hacer estos procesos escalables para la producción de grandes volúmenes de manera económica y sustentable. Se han realizado grandes avances con la incorporación de compuestos de tamaño nanométrico para mejorar las propiedades mecánicas, así como con la adición de compuestos hidrofóbicos o el entrecruzamiento para hacer las películas más resistentes al agua. El desarrollo de estas tecnologías permitirá, en un futuro, impactar positivamente en la generación de residuos sintéticos, reduciendo la contaminación en el suelo y el mar, así como brindar una mejor protección a los productos alimenticios para que sean seguros y del agrado del consumidor.

Referencias

1. Koltzenburg S, Maskos M, Nuyken O. Introduction and Basic Concepts. In: Polymer Chemistry [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2023. p. 1–16. Available from: https://link.springer.com/10.1007/978-3-662-64929-9_1
2. Burford R. Polymers: a historical perspective. Journal & Proceedings of the Royal Society of New South Wales. 2019;152(2):242–50.
3. Nayanathara Thathsarani Pilapitiya PGC, Ratnayake AS. The world of plastic waste: A review. Vol. 11, Cleaner Materials. Elsevier Ltd; 2024.
4. Kakadellis S, Harris ZM. Don't scrap the waste: The need for broader system boundaries in bioplastic food packaging life-cycle assessment – A critical review. Vol. 274, Journal of Cleaner Production. Elsevier Ltd; 2020.
5. Saltveit ME. Respiratory Metabolism. In: Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables. Elsevier; 2019. p. 73–91.
6. Selke SEM, Culter JD. Major Plastics in Packaging. In: Plastics Packaging. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG; 2016. p. 101–57.
7. Yaashikaa PR, Kamalesh R, Senthil Kumar P, Saravanan A, Vijayasri K, Rangasamy G. Recent advances in edible coatings and their application in food packaging. Food Research International. 2023 Nov;173:113366.
8. Mehetre SS, Shankar RK, Ameta RK, Behere SS. An introduction to protein-based biopolymers. In: Protein-Based Biopolymers: From Source to Biomedical Applications. Elsevier; 2022. p. 1–40.
9. Mohammed ASA, Naveed M, Jost N. Polysaccharides; Classification, Chemical Properties, and Future Perspective Applications in Fields of Pharmacology and Biological Medicine (A Review of Current Applications and Upcoming Potentialities). Vol. 29, Journal of Polymers and the Environment. Springer; 2021. p. 2359–71.



10. Zion Market Research. <https://www.zionmarketresearch.com/report/protein-films-market>. 2022. p. 1–205 Protein Films Market Size, Share, Growth Report 2032.
11. Mohamed SAA, El-Sakhawy M, El-Sakhawy MAM. Polysaccharides, Protein and Lipid -Based Natural Edible Films in Food Packaging: A Review. Vol. 238, Carbohydrate Polymers. Elsevier Ltd; 2020.
12. Fematt-flores GE, Aguiló-aguayo I, Marcos B, Camargo-olivas BA, Sánchez-vega R, Soto-caballero MC, et al. Milk Protein-Based Edible Films: Influence on Mechanical, Hydrodynamic, Optical and Antioxidant Properties. *Coatings*. 2022 Feb 1;12(2).
13. Lisitsyn A, Semenova A, Nasonova V, Polishchuk E, Revutskaya N, Kozyrev I, et al. polymers Review Approaches in Animal Proteins and Natural Polysaccharides Application for Food Packaging: Edible Film Production and Quality Estimation Academic Editors: Farayde. 2021; Available from: <https://doi.org/10.3390/polym13101592>
14. Cerqueira MA, Bourbon AI, Pinheiro AC, Martins JT, Souza BWS, Teixeira JA, et al. Galactomannans use in the development of edible films/coatings for food applications. Vol. 22, Trends in Food Science and Technology. 2011. p. 662–71.
15. Rodriguez-Canto W, Chel-Guerrero L, Fernandez VVA, Aguilar-Vega M. Delonix regia galactomannan hydrolysates: Rheological behavior and physicochemical characterization. *Carbohydr Polym*. 2019 Feb 15;206:573–82.
16. Rodriguez-Canto W, Cerqueira MA, Chel-Guerrero L, Pastrana LM, Aguilar-Vega M. Delonix regia galactomannan-based edible films: Effect of molecular weight and k-carrageenan on physicochemical properties. *Food Hydrocoll*. 2020 Jun 1;103.
17. Basiak E, Lenart A, Debeaufort F. Effect of starch type on the physico-chemical properties of edible films. *Int J Biol Macromol*. 2017 May 1;98:348–56.
18. Garrido-Balam M, Chel-Guerrero L, Gallegos-Tintoré S, Castellanos-Ruelas A, Rodríguez-Canto W, Betancur-Ancona D. Nutritional characterization of quality protein maize (QPM)

(Zea mays L.) protein concentrates. Food and Humanity. 2023 Dec;1:1250–5.

19. Chel-Guerrero L, Betancur-Ancona D, Aguilar-Vega M, Rodríguez-Canto W. Films properties of QPM corn starch with Delonix regia seed galactomannan as an edible coating material. Int J Biol Macromol. 2024 Jan 1;255.