

Biopolymers of cellulose in food packaging: Challenges and applications

Biopolímeros de celulosa en empaques alimenticios: Retos y aplicaciones

Mena-Martínez, María E.^{1*}; Hernández-Jabalera, Anaí¹; León-Espinosa, Erika Berenice¹; Cruz-Monterrosa, Rosy Gabriela¹; Rayas-Amor, Adolfo Armando¹; Díaz-Ramírez, Mayra¹; Jiménez-Guzmán, Judith¹; Miranda de la Lama, Genaro C.¹; García-Garibay, Mariano¹; López-Jiménez, Carlos J.²

¹Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Lerma. Departamento de Ciencias de la Alimentación. División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Av. de las Garzas 10, El panteón, 52005 Lerma de Villada, Estado de México. México. ²Universidad de la Costa. Carretera Libramiento Paraje de Las Pulgas, Santiago Pinotepa Nacional, Distrito Jamiltepec, Oaxaca. 71600. México.

*Autor de correspondencia: m.mena@correo.ler.uam.mx

ABSTRACT

Objective: the aim of this study was to show an overview of the use of cellulose in the food packaging industry.

Design/methodology/approach: a search was made through scientific publications in different scientific and academic databases such as: Scopus, ISI web of knowledge, Google Scholar, among others.

Results: a wide variety of information about cellulose was found, searching for "cellulose food packaging" in the Scopus database, there were around 900 papers, 177 of the year 2018 and 45 jobs so far in 2019; among them works, there are topics on improving the characteristics of paper, using cellulose derivatives, mixtures with other materials or biomaterials, chemical modifications and even the use of their nanoforms and elaboration of bionanocomposites; even more, conjugating some of these methods, the functionalization of the biopolymer is obtained, giving it new characteristics.

Study limitations/implications: the challenge of cellulosic materials is to obtain mechanical properties, barrier properties, etc. as those that petroleum-derived polymers provide food packaging.

Findings/conclusions: according to literature, cellulose has been used in the packaging industry since ancient times; nowadays, we are trying to reach the characteristics of petroleum derived polymers and without doubt improve these characteristics by offering packaging that fulfills its function and presents an added value, such as being antimicrobial and/or antioxidant.

Keywords. Cellulose, food packaging, biopolymers

RESUMEN

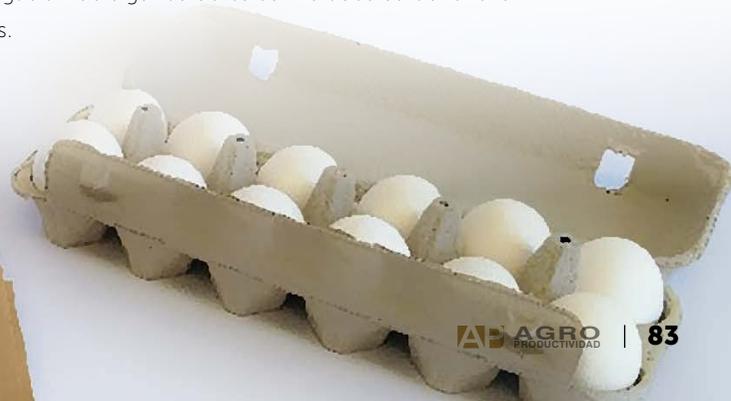
Objetivo: Expone los retos y aplicaciones de la celulosa en la industria de empaques alimentarios.

Diseño/metodología/aproximación: se realizó un análisis de reportes científicos en diferentes bases de datos científicas y académicas como: Scopus, ISI Web of Knowledge, Google académico entre otras.

Resultados: se encontró una amplia variedad de información acerca de la celulosa, realizando la búsqueda de "cellulose food packaging" en la base de datos Scopus, se encontraron alrededor de 900 trabajos, siendo 177 del año 2018 y 45 trabajos en lo que va del 2019; resaltan los enfoques de cómo mejorar las características de papel, utilizar derivados de celulosa, mezclas con otros materiales o biomateriales, modificaciones químicas hasta el uso de sus formas nano y elaboración de bionanocompositos; también, mediante la conjugación de algunos de estos métodos se obtiene la funcionalización del biopolímero brindándole nuevas características.

Agroproductividad: Vol. 12, Núm. 11, noviembre. 2019. pp: 83-88.

Recibido: enero, 2019. **Aceptado:** septiembre, 2019.



Limitaciones del estudio/implicaciones: el reto de los materiales celulósicos es obtener las propiedades mecánicas, de barrera, etc. que los polímeros derivados del petróleo proporcionan a los empaques alimentarios.

Hallazgos/conclusiones: de acuerdo a la literatura la celulosa ha estado presente en la industria de empaques desde tiempos remotos; hoy en día se está tratando de alcanzar las características que presentan los polímeros derivados del petróleo y sin duda mejorar estas características ofreciendo empaques que cumplan su función y presenten un valor agregado, por ejemplo, antimicrobiano o antioxidante.

Palabras clave: celulosa, empaques alimentarios, biopolímeros.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, un gran número de polímeros basados en combustibles fósiles son utilizados en la industria de empaques alimentarios (Abdul Khalil *et al.*, 2016; Garavand *et al.*, 2017); el enorme consumo de dichos materiales produce la acumulación de residuos, generando impacto ambiental. En consecuencia, el reciclaje de plástico se ha convertido en una opción alentadora para combatir la acumulación de residuos plásticos en nuestro entorno. Sin embargo, este sistema no funciona en envasado de alimentos debido a que pueden estar contaminados de sustancias orgánicas tóxicas (Gan y Chow, 2018). Además, hay que tener en cuenta que más del 20% de los plásticos se usan para el embalaje de alimentos (Rhim, Park y Ha, 2013), por lo que en su producción se tiene que tomar en cuenta el impacto ambiental que generarán, que mantengan la calidad (propiedades organolépticas) y la seguridad de los productos alimenticios durante el almacenamiento y transporte, que amplíen su vida útil evitando el desarrollo de microorganismos peligrosos y sus correspondientes toxinas, y además que protejan de fuerzas físicas externas, compuestos químicos, luz solar, compuestos volátiles permeables, oxígeno y humedad (Garavand *et al.*, 2017).

Debido a la enorme generación de residuos, en la última década ha aumentado el uso de bioplásticos en la industria de empaques alimentarios; éstos provienen de recursos renovables, biodegradables, compostables y no tóxicos (amigables con el ambiente), lo que los hace una excelente alternativa para esta industria. Entre los biopolímeros, se ha puesto especial atención a los polisacáridos, proteínas, lípidos y poliésteres, solos o en combinación con otros materiales; sin embargo, su uso ha sido limitado. Entre estos biopolímeros destaca la celulosa por sus propiedades y por ser el carbohidrato más abundante del planeta (Peelman *et al.*, 2013; Abdul Khalil *et al.*, 2016). Por ello, en este estudio, se analizaron las aplicaciones y retos de la celulosa en la industria de embalaje alimentario.

MATERIALES Y MÉTODOS

La celulosa es un carbohidrato complejo que consta de más de 3000 unidades repetitivas de glucosa. Es el componente estructural básico de las paredes celulares de las plantas (no digeribles por el hombre) y es uno de los biopolímeros más investigados, ya sea nativo o modificado debido a su

biocompatibilidad, biodegradabilidad y estabilidad química (Kakoria & Sinha-Ray, 2018). Sin embargo, la celulosa presenta dificultades en su uso debido a que es naturalmente hidrofóbica, insoluble en agua, con estructura cristalina (debido a su arreglo de grupos hidroxilo), baja barrera a vapor de agua, falta de propiedades antimicrobianas, propiedades mecánicas sensibles al contenido de humedad, fragilidad y degradabilidad (Peelman *et al.*, 2013). La celulosa ha estado presente en la industria del envasado tradicionalmente como papel, cartón y yute por más de 150 años (Abdul Khalil *et al.*, 2016). El papel y el cartón son materiales de embalaje livianos, naturales y biodegradables, pero exhiben otros problemas y limitaciones; el envasado por un período prolongado no es factible con ellos, ya que su resistencia mecánica, aislamiento térmico y propiedades de barrera son pobres y adsorben humedad (Kumar, Sharma & Singh, 2018).

El celofán es una película de celulosa conocida por su nombre comercial Cellophane™. Tiene muchas ventajas, tales como su abundancia, bajo costo, capacidad de renovación, degradabilidad, peso ligero y se usa ampliamente en envases para envoltura de productos de confitería, envasado de productos de panadería y quesos blandos. Las películas para microondas están disponibles con recubrimientos semipermeables que permiten cierta ventilación durante el calentamiento, lo que las hace ideales para productos de pastelería, donde la liberación de vapor de agua acumulado mantiene estable el producto (Emblem, 2012). Se le considera un "precursor" del empaque flexible moderno. No obstante, ha mostrado serios problemas debido a las sustancias tóxicas uti-

lizadas en su proceso. Por ello, se han estudiado diversas técnicas para crear películas de celulosa empleando otros disolventes, como por ejemplo, mezcla alcalí/urea/H₂O₂, enzimas o N-metil morfolina-N-óxido, entre otras principales (Paunonen, 2013).

Los derivados de la celulosa, se han utilizado para el desarrollo de películas con propiedades mejoradas en comparación con las películas de celulosa nativas (Abdul Khalil et al., 2018). Éstos se han utilizado en envases de alimentos y pueden producirse por derivatización de celulosa a partir del estado solvatado, mediante esterificación (acetato de celulosa -CA-, triacetato de celulosa y butirato de acetato de celulosa) o eterificación de grupos hidroxilo (metilcelulosa, etilcelulosa, hidroxietilcelulosa, hidroxipropilmetilcelulosa-HPMC-, hidroxipropilcelulosa y carboximetilcelulosa-CMC-) (Peelman et al., 2013; Malhotra, Keshwani & Kharkwal, 2015). Las películas de CA son las más utilizadas en el envasado de alimentos comparadas con otros derivados, debido a sus propiedades mejoradas de barrera contra el gas y la humedad. En la actualidad, el envasado con materiales celulósicos es variado, incluye tanto materiales de envoltura como envases primarios y secundarios, así como envasado flexible y rígido (Li, Mascheroni & Piergiovanni, 2015).

Dentro de las acciones de mejora de los materiales celulósicos, las propiedades de la celulosa y sus derivados restringen su uso en el envasado de alimentos, por lo que una modificación física o química controlada de la estructura de celulosa es necesaria (Roy et al., 2009). Una gran cantidad de estudios han propuesto diferentes estrategias para mejorar sus propiedades, específicamente en términos de aumentar la capacidad de barrera hacia los gases, agua, o para mejorar las propiedades mecánicas y evitar la solubilidad del bioplástico en el alimento (Peelman et al., 2013).

En cuanto a la adición de fibras de celulosa y recubrimiento de películas, las fibras celulósicas se han utilizado tradicionalmente en envases para una amplia gama de categorías de alimentos, por ejemplo, en productos alimenticios secos, congelados o alimentos líquidos, bebidas y alimentos frescos. La adición de fibras de celulosa a las películas de polímeros o biopolímeros como almidón, polihidroxibutilvalerato (PHBV), poli-ácido láctico (PLA) y policaprolactona (PCL) disminuyeron la permeabilidad al vapor de agua y mejoraron las propiedades mecánicas. Asimismo, con la aplicación de CMC, en pelícu-

las basadas en almidón, se logró una disminución de la permeabilidad al vapor de agua (Peelman et al., 2013). Se ha reportado que al recubrir películas de celulosa o sus derivados, se pueden mejorar sus propiedades, como es el caso del recubrimiento de una película de celulosa acetilada con polihidroxibutirato (PHB) que dio como resultado valores de permeabilidad al vapor de agua más bajos, así como mayor módulo elástico y resistencia a la tracción. De igual forma, las películas de celulosa con actividad antimicrobiana y altas propiedades de barrera a los gases fueron obtenidas al utilizar quitosano como recubrimiento (Peelman et al., 2013).

El método de entrecruzamiento e injerto de celulosa, involucra la formación de uniones entre diferentes cadenas moleculares para generar una red tridimensional más fuerte. Hay varias clasificaciones para emplear agentes de entrecruzamiento. Pueden clasificarse con base en el tipo de unión (entrecruzamiento covalente muy estable, formación de uniones iónicas y entrecruzamientos físicos creados por puentes de hidrogeno y fuerzas de Van der Waals). En otra clasificación, los entrecruzamientos están divididos en físicos, químicos y enzimáticos. Un entrecruzamiento fue realizado irradiando luz ultravioleta (UV) a dispersiones acuosas de almidón con celulosa microcristalina usando glicerol como plastificante para hacer películas; y se encontró una mejora en las propiedades físicas y mecánicas. Otro estudio con películas de CMC entrecruzada con glutaraldehído disminuyó la permeabilidad al vapor de agua y retrasó el proceso de biodegradación. En otro trabajo, se utilizó ácido cítrico para entrecruzar HPMC para obtener una mejora en la barrera de agua. Adicionalmente, se entrecruzaron *nanowhiskers* (CNC en forma de bigotes) de celulosa con poli-(metilviniléter-co-ácido maleico) para mejorar las propiedades físicas. Asimismo, nanocristales de celulosa bacteriana/polivinil alcohol se entrecruzaron con ácido bórico mejorando las propiedades mecánicas (Garavand et al., 2017).

El injerto es una técnica muy utilizada para hacer más funcional la celulosa, y es también, de los mejores métodos para modificar las propiedades fisicoquímicas de ésta. Los grupos -OH presentes en los átomos C2, C3 y C6 de cada unidad monomérica de las cadenas de celulosa, son los sitios activos más susceptibles para el injerto de muchas unidades monoméricas o polímeros, para la formación de una variedad de copolímeros de injerto de base celulósica con propiedades avanzadas y aplicaciones potenciales en comparación a la celulosa nativa

(Kumar *et al.*, 2018); puede utilizarse polimerización por radicales libres, polimerizaciones por radicales controladas o vivientes, y por apertura de anillo (Kang, Liu & Huang, 2015).

Nanomateriales de celulosa

Recientemente, diversas aplicaciones de nanomateriales de celulosa (CNs) han despertado un creciente interés (Wang *et al.*, 2018), particularmente en la década pasada (Stark, 2016). Este término, CNs, es aplicado a cualquier partícula celulósica con al menos una dimensión en la nanoescala. Comparada con otras nanopartículas, se consideran de bajo costo, ligeras, ambientalmente amigables, fáciles de composteo y reciclar (Stark, 2016), sobre todo, considerando que el principal obstáculo para producir CNs, es su alta demanda de energía (Lindstrom, Naderi & Wiberg, 2015).

Los CNs no tienen una clasificación rigurosa; no obstante, se pueden agrupar y nombrar de acuerdo a las tendencias actuales dependiendo de su morfología, dimensión característica, relación de aspecto, cristalinidad, estructura cristalina, fuente de obtención y propiedades, por lo que se reconocen principalmente a la *celulosa nanofibrilada* (NFC), nanocristales de celulosa (CNC), nanocristales de celulosa de tunicado (t-CNC), celulosa de algas (AC) y celulosa bacteriana (BC) (Moon *et al.*, 2011). Estas nanoestructuras tienen aplicaciones potenciales en diversos sectores industriales y permiten el desarrollo de materiales innovadores, así como el mejoramiento de otros convencionales. Entre los muchos campos de aplicación de los CNs, el área de empaques representa un campo importante (Li *et al.*, 2015; Abdul Khalil *et al.*, 2016; Stark, 2016; Ferrer, Pal & Hubbe, 2017), debido a las propiedades de barrera inherentes a los CNs, tales como la baja permeación del oxígeno (a humedades relativas inferiores al 65%) y vapor de agua (Wang *et al.*, 2018); adicionalmente, se pueden mencionar la apariencia y la mejora en la resistencia u otras propiedades mecánicas (Ferrer *et al.*, 2017). Estas propiedades pueden ser explotadas aplicando los CNs como rellenos, en composites, como cubiertas o películas delgadas auto soportadas (Li *et al.*, 2015; Ferrer *et al.*, 2017; Landa-Salgado *et al.*, 2017).

Los **bionanocompositos**, abren una oportunidad para el uso de nuevos materiales de nanocompuestos verdes de alto rendimiento y peso ligero, lo que los hace excelentes candidatos para reemplazar los materiales convencionales de envasado (Rhim *et al.*, 2013). Generalmente consisten en una matriz de biopolímero reforzada con nano relleno (perlas de sílice, zeolitas, etc.); además de la dispersión coloidal de polímeros rígidos, son mezclados a dimensión nanométrica (1-100 nm); son una nueva clase de materiales que presentan propiedades mejoradas en comparación con sus biopolímeros base, debido a la elevada relación de aspecto y la gran área superficial de las nanopartículas. Por ello, se ha intentado desarrollar bionanocompositos para películas de envasado de alimentos con biodegradabilidad y propiedades mecánicas, de barrera, reológicas y térmicas mejoradas (Rhim *et al.*, 2013).

Los polímeros incorporados con nanopartículas de arcilla estuvieron entre los primeros nanocompositos basados en polímeros que surgieron en el

mercado con materiales mejorados para el envasado de alimentos, aunque ya se utilizan en envases para bebidas carbonatadas. Los polímeros con materiales híbridos basados en fibra celulósica/nanoarcilla proporcionan una gran barrera, vida corta, fácil eliminación, y propiedades compatibles con el medio ambiente ideales para los materiales de envasado de alimentos (Abdul Khalil *et al.*, 2016). En la última década se usó esencialmente NFC en nanocompositos debido a sus propiedades de refuerzo, nanoescala y su capacidad para formar una red nanoporosa sobre el alimento cuando se aplica como película, lo que provoca una baja porosidad y un camino más tortuoso ante la difusión de gases (Bharimalla *et al.*, 2017; Ferrer *et al.*, 2017).

Como se mencionó anteriormente, la estructura de bionanocompositos ofrece nuevas propiedades como en el caso de: CA/arcilla, el almidón relleno de whiskers y NFC, celulosa nanocristalina/quitosano, donde se observó una reducción en la permeabilidad al vapor de agua; así como una distribución homogénea y mejora en las propiedades mecánicas en el bionanocomposito de quitosano, por lo que se cree que estas películas tendrán un impacto prometedor en el envasado de alimentos los próximos años (Rhim *et al.*, 2013; Bharimalla *et al.*, 2017).

Uno de los desafíos de los bionanocompositos es aumentar la compatibilidad entre las arcillas y los polímeros y alcanzar la dispersión completa de las nanopartículas. Cabe mencionar que algunas autores creen que no existe información suficiente sobre los efectos que las nanopartículas podrían hacer a la salud, por ejemplo, la adsorción de

los mismos y alergias (Siqueira, Bras & Dufresne, 2010; Abdul Khalil et al., 2016).

Funcionalización de celulosa y materiales inteligentes

Además de mejorar las propiedades necesarias para poder utilizar la celulosa en empaques alimentarios, la investigación tiende a la funcionalidad de los biopolímeros para obtener materiales inteligentes, brindando capacidad antimicrobiana, antioxidante y sensorial, por ejemplo, a la temperatura. Uno de los retos de los empaques alimentarios es evitar el crecimiento de agentes microbianos en los alimentos, los conservantes o aditivos químicos, nocivos en dosis más altas, los cuales generalmente se agregan a los alimentos durante su fabricación. Los trabajos recientes de investigación apuestan al envasado funcional de alimentos, que implica, recubrir, injertar, etc., compuestos o nanocompuestos antimicrobianos o antioxidantes en los materiales de envasado. Algunos de los utilizados en la celulosa y sus derivados, son nanopartículas de plata y quitosano, que además de mejorar las propiedades de barrera ha demostrado actividad antimicrobiana para *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* y *Listeria monocytogenes*; compuestos fenólicos como los ácidos p-hidroxibenzoico, gálico y cafeico, la dopamina, el eugenol, isoeugenol y timol, que se consideran agentes antimicrobianos potenciales y se injertan en las fibras sin blanquear con la ayuda de una enzima (algunos de estos compuestos fenólicos aportan además propieda-

des antioxidantes); también se han utilizado proteínas antimicrobianas y antibióticos (Bharimalla et al., 2017; Abdul Khalil et al., 2018; Kumar et al., 2018).

Una nueva tendencia es el uso de películas comestibles, que se usan para minimizar el crecimiento de microorganismos y evitar contaminantes superficiales durante el almacenamiento. Éstas pueden servir como portador para una amplia gama de aditivos alimentarios (antimicrobianos, antioxidantes, vitaminas etc.), tales como el ácido benzoico, sórbico, propiónico y láctico, ésteres de ácidos grasos como gliceril monolaurato, y polipéptidos como lisozima, peroxidasa, lactoferrina, nisina, entre otros. Éstos retardan el crecimiento de microorganismos en una amplia gama de productos, incluyendo carnes y quesos. Se han desarrollado películas comestibles antimicrobianas para minimizar el crecimiento de microorganismos, incluyendo *Listeria monocytogenes* (Cagri, Ustunol & Ryser, 2004; Valdés & Garrigós, 2016; Abdul Khalil et al., 2018). Además, varias nanoestructuras están desarrollándose para proporcionar propiedades inteligentes a los sistemas de envasado de alimentos, como la capacidad de eliminación de O₂, la indicación del grado de exposición a factores perjudiciales, como temperaturas inadecuadas o niveles de oxígeno (Abdul Khalil et al., 2018) (Figura 1).

Empresas de empaque alimentarios que utilizan biopolímero como celulosa

En 2008, se lanzó NatureFlex™, una película de celulosa que ofrece un rango de sellado térmico extremadamente amplio, capacidad de impresión, larga vida útil y buenas propiedades de barrera contra el gas. En la industria de embalaje se aplica en alimentos secos, confitería, productos frescos, productos lácteos, carne, bolsas y envases de té. Fiber Forms fue presentado en 2009 por Billerud Korsnäs. El embalaje de FibreForms está compuesto por 100% de fibra primaria que ofrece gran elasticidad y resistencia, y su alta pureza está aprobada para el contacto directo con los alimentos. Además, puede revestirse con una amplia gama de recubrimientos para proteger los alimentos de la luz, humedad, bacterias y otros peligros (Abdul Khalil et al., 2016). Una empresa mexicana (Biosolution), en el 2017, generó materiales basados en la fibra de celulosa de agave Azul Tequilana Weber (*Agave angustifolia*), estos bioplásticos van dirigidos hacia varios sectores industriales, entre ellos el sector alimenticio y de empaque.

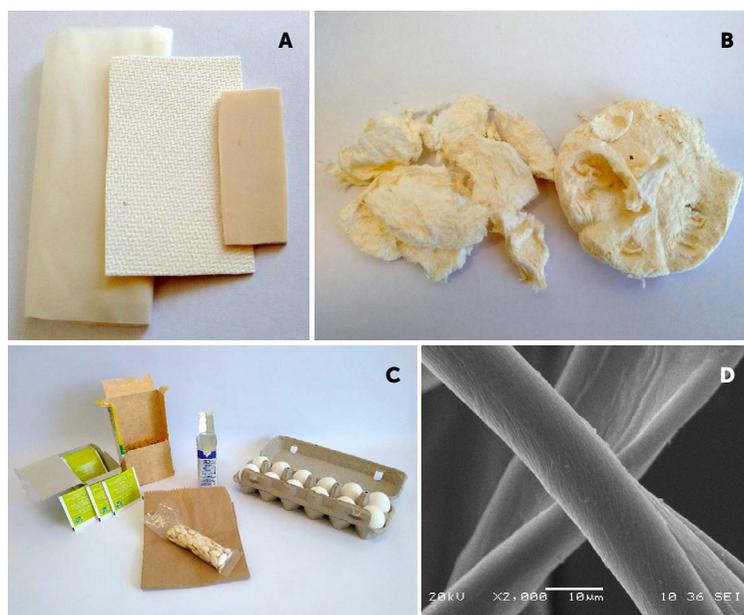


Figura 1. de izquierda a derecha. A: materiales basados en celulosa de uso en la industria. B: celulosa extraída de fuente vegetal. C: usos comunes de empaques a base de celulosa. D: micrografía de fibra de celulosa 20 kv x2000.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha mostrado un panorama general de los retos y aplicaciones de la celulosa en la industria de empaques alimentarios, desde las maneras convencionales hasta propuestas futuristas de materiales inteligentes, pasando por innovaciones demostradas y explotadas comercialmente en la actualidad. Conforme estos biopolímeros alcanzan y superan las propiedades de los plásticos derivados del petróleo, sus ventajas como biodegradabilidad y no toxicidad se hacen más evidentes y potencian su aplicación en el campo del embalaje de alimentos.

LITERATURA CITADA

- Abdul Khalil, H. P. S. et al. (2016) 'A Review on Nanocellulosic Fibres as New Material for Sustainable Packaging: Process and Applications', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 64, pp. 823–836. doi: 10.1016/j.rser.2016.06.072.
- Abdul Khalil, H. P. S. et al. (2018) 'Biodegradable Films for Fruits and Vegetables Packaging Application: Preparation and Properties', *Food Eng. Rev. Food Engineering Reviews*, 10(3), pp. 139–153. doi: 10.1007/s12393-018-9180-3.
- Bharimalla, A. K., Deshmukh, S. P., Vigneshwaran, N., Patil, P. G. & Prasad, V. (2017) 'Nanocellulose-Polymer Composites for Applications in Food Packaging: Current Status, Future Prospects and Challenges', *Polym. Plast. Technol. Eng. Taylor & Francis*, 56(8), pp. 805–823. doi: 10.1080/03602559.2016.1233281.
- Cagri, A., Ustunol, Z. & Ryser, E. T. (2004) 'Antimicrobial Edible Films and Coatings', *J. Food Prot.*, 67(4), pp. 833–848. doi: 10.4315/0362-028X-67.4.833.
- Emblem, A. (2012) 'Plastics properties for packaging materials', in Emblem, A. and Emblem, H. (eds) *Packag. Technol. Fundam. Mater. Process.* 1st edn. UK: Woodhead Publishing Limited, pp. 395–407. doi: 10.1533/9780857095701.
- Ferrer, A., Pal, L. & Hubbe, M. (2017) 'Nanocellulose in Packaging: Advances in Barrier Layer Technologies', *Ind. Crops Prod. Elsevier B.V.*, 95, pp. 574–582. doi: 10.1016/j.indcrop.2016.11.012.
- Gan, I. & Chow, W. S. (2018) 'Antimicrobial Poly(Lactic Acid)/Cellulose Bionanocomposite for Food Packaging Application: A Review', *Food Packag. Shelf Life. Elsevier*, 17(7), pp. 150–161. doi: 10.1016/j.fpsl.2018.06.012.
- Garavand, F., Rouhi, M., Razavi, S. H., Cacciotti, I. & Mohammadi, R. (2017) 'Improving the Integrity of Natural Biopolymer Films Used in Food Packaging by Crosslinking Approach: A Review', *Int. J. Biol. Macromol.*, pp. 687–707. doi: 10.1016/j.jbiomac.2017.06.093.
- Kakoria, A. & Sinha-Ray, S. (2018) 'A Review on Biopolymer-Based Fibers via Electrospinning and Solution Blowing and Their Applications', *Fibers*, 6(3), pp. 1–53. doi: 10.3390/fib6030045.
- Kang, H., Liu, R. & Huang, Y. (2015) 'Graft modification of cellulose: Methods, properties and applications', *Polymer (Guildf.)*, 70, pp. A1–A16. doi: 10.1016/j.polymer.2015.05.041.
- Kumar, R., Sharma, R. K. & Singh, A. P. (2018) 'Grafted Cellulose: A Bio-Based Polymer for Durable Applications', *Polym. Bull. Springer Berlin Heidelberg*, pp. 2213–2242. doi: 10.1007/s00289-017-2136-6.
- Landa-Salgado, P., Cruz-Monterrosa, R. G., Hernández-Guzmán, F. J. & Reséndiz-Cruz, V. (2017) 'Nanotecnología en la industria alimentaria: bionanocompuestos en empaques de alimenticios', *Agroproductividad*, 10(10), pp. 34–40.
- Li, F., Mascheroni, E. & Piergiovanni, L. (2015) 'The Potential of NanoCellulose in the Packaging Field: A Review', *Packag. Technol. Sci.*, 28(6), pp. 475–508. doi: 10.1002/pts.2121.
- Lindstrom, T., Naderi, A. & Wiberg, A. (2015) 'Large Scale Applications of Nanocellulosic Materials - A Comprehensive Review -', *J. Korea Tech. Assoc. Pulp Pap. Ind.*, 47(6), pp. 5–21. doi: 10.7584/ktappi.2015.47.6.005.
- Malhotra, B., Keshwani, A. & Kharkwal, H. (2015) 'Natural Polymer Based Cling Films for Food Packaging', *Int. J. Pharm. Pharm. Sci.*, 7(4), pp. 10–18.
- Moon, R. J., Martini, A., Nairn, J., Simonsen, J. & Youngblood, J. (2011) 'Cellulose Nanomaterials Review: Structure, Properties and Nanocomposites', *Chem. Soc. Rev.*, 40(7), pp. 3941–3994. doi: 10.1039/c0cs00108b.
- Paunonen, S. (2013) 'Strength and Barrier Enhancements of Cellophane and Cellulose Derivative Films: A Review', *BioResources*, 8(2), pp. 3098–3121. doi: 10.15376/biores.8.2.3098-3121.
- Peelman, N. et al. (2013) 'Application of Bioplastics for Food Packaging', *Trends Food Sci. Technol. Elsevier Ltd*, 32(2), pp. 128–141. doi: 10.1016/j.tifs.2013.06.003.
- Rhim, J.-W., Park, H.-M. & Ha, C.-S. (2013) 'Bio-Nanocomposites for Food Packaging Applications', *Prog. Polym. Sci. Elsevier*, 38(10–11), pp. 1629–1652. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2013.05.008.
- Roy, D., Semsarilar, M., Guthrie, J. T. & Perrier, S. (2009) 'Cellulose modification by polymer grafting: a review', *Chem. Soc. Rev.*, 38(7), pp. 1825–2148. doi: 10.1039/b808639g.
- Siqueira, G., Bras, J. & Dufresne, A. (2010) 'Cellulosic Bionanocomposites: A review of Preparation, Properties and Applications', *Polymers (Basel)*, pp. 728–765. doi: 10.3390/polym2040728.
- Stark, N. M. (2016) 'Opportunities for Cellulose Nanomaterials in Packaging Films: A Review and Future Trends', *J. Renew. Mater.*, 4(5), pp. 313–326. doi: 10.7569/JRM.2016.634115.
- Valdés, A. & Garrigós, M. C. (2016) 'Carbohydrate-Based Advanced Biomaterials for Food Sustainability: A Review', *Mater. Sci. Forum*, 842, pp. 182–195. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.842.182.
- Wang, J. et al. (2018) 'Moisture and Oxygen Barrier Properties of Cellulose Nanomaterial-Based Films', *ACS Sustain. Chem. Eng.*, 6(1), pp. 49–70. doi: 10.1021/acssuschemeng.7b03523.

