

Biopolímeros y pectina: Una revisión con Tree of Science*

Biopolymers and pectin: A review with Tree of Science

Recibido: septiembre 12 de 2022 - Evaluado: noviembre 2 de 2022 - Aceptado: diciembre 20 de 2022

Viviana Andrea Morales Sánchez**
Joohan Andrés Zuluaga-García ***
Juan David Aguirre Salazar****
Diomer Aristizábal-Buitrago*****
Ana Marcela Ruiz Montilla*****

Para citar este artículo / To cite this Article

V. A. Morales-Sánchez, J. A. Zuluaga-García, J. D. Aguirre-Salazar, D. Aristizábal-Buitrago, A. M. Ruiz-Montilla “Biopolímeros y pectina: Una revisión con Tree of Science” Revista de Ingenierías Interfaces, vol. 5, no. 2, pp.1-14, 2022.

Resumen

La mayoría de los materiales empleados para el envasado alimentario son derivados del petróleo, una alternativa que se plantea en esta revisión es la utilización de materiales biodegradables que satisfacen las crecientes demandas de la sociedad para la sostenibilidad y la seguridad ambiental, y de esta manera mitigar el consumo. Por esta razón, recientemente han surgido propuestas de diferentes biopolímeros para disminuir el impacto ambiental de los plásticos de un solo uso. Este estudio presenta una revisión sobre la pectina como una opción de biopolímero para la solución de estos problemas ambientales. Se realizó una búsqueda en Scopus y los resultados se subieron a la plataforma de Tree of Science para identificar los artículos, raíz, tronco y ramas (subáreas). Los resultados muestran que, aunque el uso de biopolímeros ha sido limitado debido a las pobres propiedades mecánicas y de barrera, estas propiedades pueden mejorarse revistiendo la parte exterior con nanocompositos, tales como las nanoarcillas, las cuales presentan un material cristalino de grano fino que se utiliza como aditivo para la fabricación de nanocompuestos y mejorar significativamente las propiedades de los materiales poliméricos.

Palabras clave: Pectina, biodegradables, polímeros, Tree of Science, seguridad ambiental.

*Artículo inédito: “Biopolímeros y pectina: Una revisión con Tree of Science”.

**Correo electrónico: viviana.morales@ucaldas.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-5081-8228>, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, departamento de química, Universidad de Caldas-Colombia.

***Correo electrónico: joohan.501814776@ucaldas.edu.co, <https://orcid.org/0000-0001-9104-3038>, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Caldas-Colombia.

****Correo electrónico: juan.501815003@ucaldas.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-6438-2461> Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Caldas-Colombia.

*****Correo electrónico: dhernab@sena.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-8965-9842>, Servicio Nacional de Aprendizaje, Regional Caldas, Colombia.

***** Correo electrónico: ana.ruiz33184@ucaldas.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-7620-8188>, Universidad de Caldas, Colombia.

Abstract

Most of the materials used for food packaging are derived from petroleum, an alternative proposed in this review is the use of biodegradable materials that meet the growing demands of society for sustainability and environmental safety, and thus mitigate consumption. For this reason, proposals for different biopolymers have recently emerged to decrease the environmental impact of single-use plastics. This study presents a review of pectin as a biopolymer option for the solution of these environmental problems. A Scopus search was performed and the results were uploaded to the Tree of Science platform to identify articles, root, trunk and branches (subareas). The results show that, although the use of biopolymers has been limited due to poor mechanical and barrier properties, these properties can be improved by coating the outside with nanocomposites, such as nanoclays, which present a fine-grained crystalline material that is used as an additive for the manufacture of nanocomposites and significantly improve the properties of polymeric materials.

Keywords: Pectin, biodegradable, polymers, Tree of Science, environmental safety.

1. Introducción

La pectina pertenece a una familia de polisacáridos complejos presentes en todas las paredes celulares primarias de las plantas [1]. La complicada estructura de los polisacáridos pécticos, y la retención por parte de las plantas del gran número de genes necesarios para sintetizar pectina, sugiere que las pectinas tienen múltiples funciones en el crecimiento y desarrollo de las plantas [2]. En esta revisión resumimos el nivel actual de comprensión de la estructura primaria y terciaria de la pectina, y describimos nuevos métodos que pueden ser útiles para estudiar la estructura localizada de la pectina en la pared celular de la planta. También discutimos los avances en la comprensión de cómo se biosintetiza la pectina y revisamos las actividades biológicas y los posibles modos de acción de los oligosacáridos pécticos denominados oligogalacturónidos.

Presentamos nuestro punto de vista sobre las cuestiones críticas relativas a la estructura, la biosíntesis y la función de la pectina que deben abordarse en la próxima década. A medida que la comunidad vegetal se esfuerza por comprender las funciones de las decenas de miles de genes expresados por las plantas, es probable que un gran número de esos genes estén implicados en la síntesis, el recambio, la actividad biológica y la reestructuración de la pectina. Será necesaria una combinación de enfoques genéticos, moleculares, bioquímicos y químicos para comprender plenamente la función y la biosíntesis de la pectina. Se revisa nuestro nivel actual de comprensión de la estructura, la biosíntesis y la función del polisacárido de la pared celular de las plantas, la pectina [3].

Por otra parte, los polisacáridos son las entidades estructurales clave en los materiales alimentarios. Por lo general, las interacciones entre las proteínas y los polisacáridos en medios acuosos pueden dar lugar a sistemas monofásicos o bifásicos, observándose generalmente estos últimos. En algunos casos de atracción neta entre proteínas y polisacáridos, mediada principalmente por interacciones electrostáticas, se produce una coacervación compleja o una separación de fases asociativa, dando lugar a la formación de complejos proteína-polisacárido. Factores fisicoquímicos como el pH, la fuerza iónica, la

proporción entre proteína y polisacárido, la carga del polisacárido y de la proteína, y el peso molecular afectan a la formación y estabilidad de dichos complejos. Además, la temperatura y los factores mecánicos (presión, velocidad de cizallamiento y tiempo) influyen en la separación de fases y en la estabilidad temporal del sistema. Los complejos proteína-polisacárido presentan mejores propiedades funcionales que las de las proteínas y los polisacáridos por separado. Esta mejora podría atribuirse a la presencia simultánea de los dos biopolímeros, así como a la estructura de los complejos. En consecuencia, las interesantes propiedades de hidratación (solubilidad, viscosidad), estructuración (agregación, gelificación) y superficie (espumación, emulsión) de estos complejos pueden utilizarse en varios ámbitos. Entre otros, podrían ser la purificación macromolecular, la microencapsulación, la formulación de alimentos (sustitutos de la grasa, agentes texturizantes) y la síntesis de biomateriales (películas comestibles, injertos artificiales) [4].

La pectina debido a su mecanismo de gelificación simple y citocompatible, se ha explotado recientemente para diferentes aplicaciones biomédicas, como la administración de fármacos, la administración de genes, la curación de heridas y la ingeniería de tejidos. Se revisan los estudios recientes sobre la pectina para el campo biomédico, con el objetivo de captar el estado del arte de la investigación actual sobre los geles de pectina para aplicaciones biomédicas, saliendo de los campos de aplicación tradicionales como la industria alimentaria o la farmacéutica. Se discute la estructura de la pectina, las fuentes y los procedimientos de extracción, centrándose en las propiedades del polisacárido que pueden ser ajustadas para optimizar los geles para una aplicación deseada y que poseen un papel fundamental en la aplicación de la pectina en el campo biomédico [5].

La necesidad de estudiar a profundidad el impacto de los biopolímeros y las pectinas como fuente de bioprospección y aprovechamiento en medicamentos y alimentos ha generado desde hace varias décadas un interés creciente. En este sentido, numerosas revisiones de literatura han emergido para entender las diferentes controversias que ha ocasionado el tema. Por ejemplo, Schmitt et al. [6], mencionan que las proteínas y los polisacáridos alimentarios son las dos entidades estructurales clave en los materiales alimentarios. Los cuales podrían ser la purificación macromolecular, la microencapsulación, la formulación de alimentos (sustitutos de grasas, agentes texturizantes) y la síntesis de biomateriales (películas comestibles, injertos artificiales) [7]. Sin embargo, no hay revisiones que apliquen Tree of Science (ToS) en polímeros con pectina.

Identificar los artículos relacionados con un área del conocimiento puede ser un proceso largo y manual debido a la gran cantidad de información que se tiene acceso hoy en día. En este estudio se utilizó la base de datos de Scopus y después se aplicó el algoritmo de ToS para seleccionar los artículos. Inicialmente, ToS se creó únicamente para búsquedas con Web of Science (WoS) debido a la facilidad del manejo de las referencias [8]. Sin embargo, Scopus es una base de datos importante dentro de la comunidad científica y, recientemente, la corporación Core of Science desarrolló una aplicación para generar el ToS con los datos de Scopus [9]. En este sentido, este artículo es novedoso tanto en la parte temática como en la parte metodológica.

Desde la antigüedad, los biopolímeros han sido utilizados por la humanidad como alimento. Muchos tipos de biopolímeros son ingredientes naturales que varían en sus características

moleculares y propiedades funcionales. Además, la biodegradabilidad de los biopolímeros los convierte en un avance específico para el ser humano y el medio ambiente. Su objetivo es ofrecer información científica y técnica completa sobre el papel de los biopolímeros en el procesamiento de alimentos, las propiedades de textura de los geles alimentarios, el uso de recubrimientos de biopolímeros y la aplicación de biopolímeros en la congelación de zumos y pulpas de frutas. También se revisan los principios en los que se basa el diseño de los biopolímeros. Los ingenieros y los profesionales relacionados con la industria alimentaria podrán acceder fácilmente a nuevos retos y oportunidades. Además, esta información debería mejorar la introducción y la modificación de los alimentos saludables a base de biopolímeros con respecto a las expectativas de los consumidores y la demanda del mercado en un futuro próximo [10].

2. Materiales y Métodos

Scopus fue la base de datos que se utilizó para identificar los principales aportes sobre biopolímeros y pectina. Se escogió porque contiene más de 60 millones de registros y es una de las más populares dentro de la comunidad científica [4]. Las palabras utilizadas fueron “biopolymer*” en título, y “pectin” en título, resumen y palabras claves. El rango de fechas fue desde el 2000 hasta el noviembre 10 del 2022. Se exportaron 297 documentos de Scopus y se subieron a la plataforma de ToS [9]. ToS usa el algoritmo SAP para identificar los artículos en la raíz, tronco y ramas. Este algoritmo crea una red de citas e identifica los artículos a partir de unas métricas basadas en el proceso de la savia bruta y la savia elaborada que ocurre en las plantas. Una explicación detallada se encuentra en el artículo de Valencia-Hernandez et al. [11].

ToS ha sido utilizado en diferentes áreas del conocimiento como administración [12]–[14], mercadeo [15], [16], emprendimiento [17], [18], salud [19], educación [19], [20], ciencias naturales [21] y psicología [22]. Eggers et al. [23] explican de forma detallada los activadores del proceso de difusión y adopción de la herramienta.

3. Resultados

Raíz

Los artículos de la raíz representan los pilares de un área del conocimiento, son esos artículos y aportes teóricos en los cuales, las siguientes investigaciones se apoyaron para soportar sus ideas. Para el área de biopolímeros, el trabajo de los investigadores Hodge et al. [24] es el primero donde mostraron la influencia del agua en los polímeros (alcohol vínfilico) alterando su cristalinidad con el tiempo. En las raíces también se encuentran trabajos relacionados con las propiedades de las pectinas como el de Thakur et al. [7] donde muestran las diferentes aplicaciones y usos industriales debido a su propiedad de gelificación sobre todo en frutas como la manzana y la naranja. Más adelante, Schmitt et al. [6] plantearon que las propiedades de superficie, estructuración e hidratación de estos

polisacáridos (pectina) podrían ser útiles para la formación de biomateriales como los polímeros.

Las propiedades de biopolímeros como la pectina y su formación dentro de las plantas es un proceso que requiere más investigaciones empíricas para entender sus propiedades y las posibilidades de extracción [3]. El comportamiento de las mezclas de solución y gel de biopolímeros está enfocado en aspectos que son de particular relevancia para los materiales que se encuentran en los sistemas alimentarios. A pesar de que, en los últimos años, se ha acumulado una literatura considerable sobre las mezclas de biopolímeros, sigue siendo un hecho que aún se dificulta diseñar la microestructura de compuestos de biopolímeros mixtos, aunque está claro que existe una ventaja tecnológica considerable para poder hacerlo [25].

Entre estas mezclas, se pueden apreciar las interacciones entre las proteínas y los polisacáridos, como se puede observar en los sistemas relacionados con los alimentos, se analiza sistemáticamente separando las interacciones de los biopolímeros en tipos dominados por la entalpía y la entropía, respectivamente. Las separaciones de fase típicamente impulsadas por la entalpía, como la incompatibilidad de biopolímeros, descrita por la teoría clásica de Flory-Huggins son un claro ejemplo de ello. Este comportamiento se observa, por ejemplo, para el sistema gelatina-dextrano. En sistemas mixtos donde el volumen excluido o la interacción de agotamiento juegan un papel importante, la separación de fases está impulsada principalmente por la entropía [26].

Las interacciones entre proteínas y polisacáridos son de gran interés para la industria alimentaria. Tal es el caso del efecto desestabilizador del cloruro de sodio, la urea y la temperatura causado por interacciones de fuerzas electrostáticas y, en menor medida, por puentes de hidrógeno [27]. Otras interacciones de tipo condensación, pueden estar mediadas por los mecanismos y la cinética de las reacciones de fenolformaldehído en condiciones de síntesis perfectamente controladas (temperatura, estequiometría y pH) del catalizador básico afectando a los mecanismos y cinética de condensación y, por tanto, a la composición de la reacción [28].

Además de las aplicaciones alimentarias de este tipo de biopolímeros, también se tiene en cuenta aplicaciones en el área de la salud. Por ejemplo, para la pectina debido a su mecanismo de gelificación simple y citocompatible, se ha explotado recientemente para diferentes aplicaciones biomédicas, incluida la administración de fármacos, la administración de genes, la curación de heridas y la ingeniería de tejidos. En estudios recientes, se han discutido la estructura, las fuentes y los procedimientos de extracción de la pectina centrándose en las propiedades del polisacárido que se pueden ajustar para optimizar los geles para una aplicación deseada [5].

La pectina es una familia de polisacáridos complejos presentes en todas las paredes celulares primarias de las plantas. La complicada estructura de los polisacáridos pécticos y la retención por parte de las plantas de la gran cantidad de genes necesarios para sintetizar pectina sugiere que las pectinas tienen múltiples funciones en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Será necesaria una combinación de enfoques genéticos, moleculares, bioquímicos y químicos para comprender completamente la función y la biosíntesis de la

pectina [3]. Por el momento, se tienen adelantos significativos en los parámetros termodinámicos de los complejos de β -lactoglobulina-pectina evaluados por calorimetría de titulación isotérmica para determinar la constante de unión, la estequiometría, la entalpía y la entropía de los complejos de β -lactoglobulina/pectina de bajo y alto metoxilo (β -lg-LM- y HM-pectina) a 22 °C y a pH 4. Las isotermas de unión revelaron la formación de complejos intrapoliméricos solubles (C1) seguida además por su agregación en complejos interpoliméricos (C2). La interacción entre β -lg y pectina LM o HM en C1 y C2 ocurrió espontáneamente con una energía libre de Gibbs alrededor de -10 kcal/mol [29].

Tronco

Neiryneck et al. [30] Analizaron la relación de biopolímeros en las interacciones proteína de suero-pectina y los factores determinantes en la solubilidad de los. Los valores de pH por encima del punto isoeléctrico generaron complejos solubles o la denominada cosolubilidad, independientemente de la cantidad de pectina, además se dedujo el efecto estabilizador de emulsiones con proteínas siempre y cuando se evite la precipitación electrostática de la proteína. , estudios similares reportan la caracterización de partículas de polímero basadas en tratamientos térmicos de complejos electrostáticos proteína-polisacárido formados de β -lactoglobulina y pectina de remolacha. Después de determinar el pH óptimo, se realizó el tratamiento térmico del biopolímero con variaciones de 30-90 °C a 0,8 °C/min. Encontrando que la presencia de pectina incrementó la temperatura de agregación térmica de la proteína, siendo estable a modificaciones de pH, siendo reportadas este tipo de modificaciones para encapsulación y suministro de componentes alimentarios bioactivos [31].

Otros artículos relacionados con análisis térmicos incluyen el uso de complejos de β -lactoglobulina con pectinas o carragenina para la obtención de partículas estables de biopolímeros. Encontrando que biopolímeros con bajo contenido de metoxilo y carragenina presentaron poco impacto en la temperatura de desnaturalización térmica de la β -lactoglobulina. Se describe, además, se atribuyeron mayores fuerzas de las interacciones electrostáticas de atracción entre las moléculas de proteína y carragenina, en comparación con las moléculas de proteína y pectina [3].

Rama 1: Evaluación de la formación de complejos de proteínas para el mejoramiento nutricional de la comida

La pegajosidad es una combinación entre adhesión y cohesión, lo cual es una característica clave para los aglutinantes presentes en la comida. Debido a esta importancia que representa, Pascal et al. [32] destacaron que una viscoelasticidad característica para la pegajosidad de los adhesivos sensibles a la presión y cómo se puede adaptar a través de la mezcla de biopolímeros, usando para esto proteína guisante y pectina de manzana. Por otra parte y debido a el interés en el uso de polímeros de origen vegetal para la coacervación compleja, en el año 2022 se investigó el impacto del grado de metoxilación (DM) y el patrón de grupos carboxilo libres de pectina en la coacervación compleja con fracciones de

proteína de guisante soluble; probando así las interacciones cualitativas mediante la medición de la turbidez, la observación visual y microscopía [33].

Estudios anteriores demostraron también la influencia de la concentración de biopolímeros y el pH en la pegajosidad. Debido a que una propiedad clave de los agentes aglutinantes o los llamados "pegamentos alimentarios" es su pegajosidad, dicha propiedad se rige por un equilibrio entre la adhesión y la cohesión, estos intereses, llevaron a la investigación de la pegajosidad de las mezclas concentradas de proteína de guisante y pectina de manzana (proporción de mezcla $r = 6:1$) a diferentes concentraciones de biopolímeros (17,5–50,0 % p/p) y valores de pH (3,50, 4,75, 6,00), demostrando así que tanto la concentración de biopolímero como el pH se pueden usar para adaptar la adhesión y la cohesión [2]. Además, hay estudios de la utilización de oleoresina rica en carotenoides de alto valor obtenida por extracción con dióxido de carbono supercrítico (SFE-CO₂), con el fin de desarrollar cinco variantes de sistema de administración microencapsulado, basado en aislado de proteína de suero (WPI), en combinación con inulina (I), pectina (P) o lactosa (L), lo que permitió obtener cinco polvos, con diferente perfil fitoquímico [34].

Por otro lado, se revisó el establecimiento de la proporción de biopolímeros de complejos de proteína de suero-pectina antes y después de la estabilización térmica, debido a que se pueden aplicar sustitutos de grasa para mejorar la cremosidad, ya que a menudo poseen una gran capacidad para retener el agua, mostrando así, una estructura compleja porosa dominada por proteínas de suero de leche desnaturalizadas, que estaban unidas por pocas moléculas de pectina [35]. Lan et al. [36] hicieron una revisión sobre un aislado de proteína de guisante para mejorar así el efecto del pH, proporción de biopolímeros y concentraciones de este mismo, debido al gran interés presentado en la incorporación de proteína de guisante como proteína animal alternativa, preferida a su vez en bebidas fortificadas con proteínas, debido a su precio más económico, más sostenible y libre de gluten que se puede declarar en la etiqueta, el estudio fue realizado con el fin de proporcionar información útil en el diseño de bebidas fortificadas con proteína de guisante, con una mayor estabilidad de la proteína de guisante.

Investigaciones sobre la coacervación compleja entre lisozima y pectina han mostrado el efecto del pH y sal en la proporción de biopolímero. Souza et al. [37] estudiaron la interacción entre lisozima y pectina mediante acidificación utilizando potencial zeta, medidas de turbidez y titulación calorimétrica. Los complejos se analizaron en varias concentraciones de NaCl con diferentes proporciones, probando así que el proceso de formación de coacervados complejos ocurrió en dos pasos diferentes, presentando contribuciones entálpicas y entrópicas favorables. Además, Zeeb et al. [38] realizaron estudios sobre fenómenos de crecimiento en complejos de biopolímeros compuestos por WPI calentado y pectina, debido a un comportamiento de crecimiento inusual de complejos de biopolímeros compuestos por aislado de proteína de suero (WPI) y pectina con varios grados de esterificación (DE), demostrando como resultados que el tamaño inicial y la carga superficial de las partículas de biopolímero dependían de las pectinas DE.

También se evaluaron el impacto de las proporciones de biopolímeros en dispersiones de carne, utilizando un procedimiento de varios pasos para generar complejos estables en el proceso, que posteriormente se incrustaron en salchichas tipo emulsión, mientras que luego

se evaluaron las propiedades macro y microestructurales. Los resultados muestran las posibilidades de producir enlatados de carne con bajas cantidades de grasa [39]. El estudio de los investigadores Zeeb et al. [40] se basó en la formación de partículas concentradas compuestas de biopolímeros de carga opuesta para aplicaciones alimentarias, debido a que los enfoques de complejos asociativos son herramientas prometedoras para generar partículas de biopolímeros mixtos con propiedades fisicoquímicas personalizadas. Sin embargo, la asociación de biopolímeros con carga opuesta se produce normalmente en condiciones ácidas y en bajas concentraciones de biopolímeros. Los resultados son de importancia para futuros estudios donde se pretenda incorporar partículas de biopolímeros concentrados como sustituto de grasa en matrices cárnicas y lácteas.

Rama 2: Diferentes aplicaciones y posibles usos de los biopolímeros

En diferentes estudios realizados con biopolímeros, se demuestran sus múltiples aplicaciones; por ejemplo, en la conservación de alimentos se puede crear una película de pectina a base de clavos (*Syzygium aromaticum*) para la preservación de tortillas de maíz frente al ataque de bacterias como *Staphylococcus aureus* y *Candida parapsilosis* logrando preservar el alimento de manera eficaz [41]. Adicionalmente, se ha comprobado que la pectina es un reticulante exitoso para la preparación de membranas hidrofílicas, es decir con una capacidad de interactuar fácilmente con el agua como medio universal gracias a sus grupos polares; además es de alta durabilidad basadas en biopolímeros [42]. Otros estudios, han mostrado que también la pectina se puede llegar a endurecer más y conferir estabilidad a las películas de biopolímeros con óxido de silicio, el cual se encuentra en las arenas y es el mineral más abundante del planeta. Por ejemplo, Marangoni et al. [43] lograron determinar la concentración de SiO₂ al 5% como la más adecuada para mejorar las propiedades mecánicas, térmicas y de barrera simultáneamente.

Ramos-Andrés et al. [44] generaron a escala piloto diferentes películas de biopolímeros purificados basados en tratamiento hidrotérmal en ciclos de reactores de flujo continuo. Los investigadores lograron producir cinco fracciones sólidas purificadas de los biopolímeros hemicelulosa y pectina por primera vez a partir de zanahorias desechadas [44]. Mientras que Chu et al. [45] obtuvieron por medio de cavitación acústica e hidrodinámica de corta duración, geles de pectina extraída de mandarina que son siete veces más fuertes en promedio que las obtenidas por la industria alimenticia. Choudhary et al. [46] hacen una revisión logrando recopilar diferentes métodos y aspectos importantes a tener en cuenta a la hora de investigar y producir polímeros a base de pectina y otros polisacáridos extraídos principalmente de fuentes vegetales, en especial, de desecho para llegar a contribuir con la economía circular o regenerativa. Geetanjali & Singh [47], en el capítulo 3 de su libro Producción de nanopartículas a base de biopolímeros, hablan de los nanomateriales producidos a partir de películas de los biopolímeros celulosa, hemicelulosa, lignina y pectina. También de su importancia como fuentes renovables y una posible sustitución a los plásticos y energía provenientes del petróleo.

En tal caso, dado que Colombia es considerado un país cafetero en el mundo. Dao et al. [48] evaluaron el potencial de los biopolímeros de pectina y celulosa extraídas de pulpa de café; y por medio de blanqueamiento con peróxido de hidrógeno extrajeron el 54% de

celulosa, las cuales tienen una superficie lisa, alta transparencia, una resistencia a la tracción de 3 MPa y un alargamiento del 4%. Es decir que se podría lograr producciones significativas de biopolímeros en zonas cafeteras de Colombia que a su vez servirán de empaques biodegradables para los cafés especiales de la región y su posterior exportación. Pero para Tang et al. [49], lo primordial es comparar la rentabilidad de las diferentes producciones de biopolímeros, puesto que no sería factible la sustitución de los empaques derivados del petróleo cuando el precio del mismo sea mucho menor. Además, estos deben brindar las mismas o mejores cualidades de protección mecánica contra el oxígeno y la humedad que los plásticos no renovables brindan en la actualidad. Por último, pero no menos importante, Tiozon et al. [50] exponen la propiedad de los biopolímeros de mejorar las funcionalidades del almidón de arroz para la industria alimentaria. A parte también mencionan la importancia de futuras investigaciones en las diferentes variedades de arroz en el mundo, y aseguran que sería viable un fitomejoramiento genético de los cultivares de arroz para lograr la mayor potencia de contenidos de polisacáridos para la consiguiente extracción de biopolímeros.

Rama 3: Técnicas de caracterización del biopolímero pectina extraída de la biomasa.

En el transcurso de algunas décadas, la preocupación por los daños medioambientales de los combustibles fósiles, el aumento de las emisiones de CO₂ y la disminución del hidrógeno han ido creciendo cada vez más. En consecuencia, la producción de hidrógeno es un tema crucial hoy en día. Para ello, se utilizan diferentes polímeros. Entre todos los polímeros, los polímeros biodegradables son las mejores opciones para desarrollar el objetivo principal. Los polisacáridos y las proteínas son polímeros biodegradables que ocupan un lugar único y presentan ventajas en cuanto a sus propiedades ecológicas. Existen diferentes técnicas para aplicar y conseguir el objetivo principal. Cabe mencionar que los métodos ecológicos y sencillos siempre atraen la atención en diferentes aspectos y campos. En este trabajo se revisan las tres técnicas no contaminantes y económicas, es decir, la reacción electroquímica de evolución del hidrógeno (HER), la técnica fotocatalítica y la hidrólisis de hidruros. Esta revisión ayuda a los investigadores, partidarios del medio ambiente, a evaluar y elegir los biopolímeros y procesos más ecológicos en su trabajo [51].

La estructura química de la pectina consiste principalmente en ácido D-galacturónico (homopolímero de unidades de ácido 1,4 α -D-galacturónico con diversos grados de grupos carboxilos metil-esterificados) y bloques de ramnogalacturonano I (RGI) y ramnogalacturonano II (RGII) unidos covalentemente entre sí. Los grupos hidroxilos del ácido D-galacturónico en los átomos de carbono 1 y 4 están en posición axial; el polímero formado es un 1,4-polisacárido. En función del contenido de ésteres, la pectina se divide en pectina de alto y bajo metoxismo. La pectina de alto metoxismo (HM) tiene un 50% de grupos carboxilos en su columna vertebral de polisacáridos, mientras que la pectina de bajo metoxismo (LM) tiene menos del 50% de ésteres metílicos. La pectina se utiliza ampliamente como agente gelificante en la industria alimentaria, en aplicaciones biomédicas y en la industria farmacéutica, y actúa como sustituto de la grasa. La estructura aniónica de la pectina desempeña un papel crucial en la creación de sitios de coordinación con los cationes metálicos en los sistemas de electrolitos poliméricos. El aumento del

número de sitios de coordinación en la estructura polimérica se proyecta para aumentar la disociación de iones, lo que facilita la mejora de la conductividad iónica.

Por otra parte, los biopolímeros obtenidos de la biomasa como es el caso de las pectinas se pueden caracterizar por técnicas como Análisis por espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier FTIR, para determinar las vibraciones que tienen los enlaces de las moléculas a números de onda específicos, de allí que se vean vibraciones para diferentes tipos de enlaces. Análisis por difracción de rayos X DRX, se utilizará para confirmar la naturaleza amorfa de los recubrimientos. Análisis termogravimétrico TGA, una técnica que consiste en determinar la pérdida de masa que experimenta una muestra mediante nitrógeno y bajo condiciones controladas. Calorimetría diferencial de barrido (DSC), es una técnica de caracterización que permite identificar la transición vítrea del material. Análisis ángulo de contacto, que permite determinar qué tan hidrofóbico e hidrofílico es el material analizado.[52].

Conclusiones

Este estudio muestra la evolución de los conceptos alrededor de los biopolímeros a partir de la pectina usando la analogía del árbol de la ciencia a partir de una consulta en Scopus. Los resultados en general, mostraron diferentes aplicaciones de este tipo de biopolímeros desde la producción de alimentos hasta aplicaciones en salud. Se puede determinar que estas pectinas podrían contribuir a diferentes industrias logrando un impacto medioambiental positivo a corto plazo. Se abren un sin fin de posibilidades en cuanto a las aplicaciones de biopolímeros en base de la extracción de polisacáridos que se obtienen de la materia vegetal, muchas veces de residuos orgánicos. Por lo tanto, es necesaria una investigación continua para mejorar estos procesos en cuanto a calidad y rentabilidad, y poder llegar así a cumplir metas ecológicas, económicas y sociales.

Los biopolímeros obtenidos de la biomasa permiten minimizar el consumo de plásticos derivados del petróleo por bioplásticos, y de esta manera contribuir con el ambiente y la seguridad alimentaria. Una de las principales limitaciones durante esta investigación fue la búsqueda en una sola base de datos. Se recomienda que futuras investigaciones utilicen WoS para contrastar y ampliar los hallazgos de este estudio.

Referencias

[1]A. G. J. Voragen, G.-J. Coenen, R. P. Verhoef, and H. A. Schols, “Pectin, a versatile polysaccharide present in plant cell walls,” *Struct. Chem.*, vol. 20, no. 2, pp. 263–275, Apr. 2009, doi: 10.1007/s11224-009-9442-z.

[2]P. Moll, H. Salminen, C. Roeth, C. Schmitt, and J. Weiss, “Concentrated pea protein – apple pectin mixtures as food glue: Influence of biopolymer concentration and pH on stickiness,” *Food Hydrocoll.*, vol. 130, p. 107671, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.foodhyd.2022.107671.

[3]B. L. Ridley, M. A. O'Neill, and D. Mohnen, "Pectins: structure, biosynthesis, and oligogalacturonide-related signaling," *Phytochemistry*, vol. 57, no. 6, pp. 929–967, Jul. 2001, doi: 10.1016/S0031-9422(01)00113-3.

[4]J. A. Moral-Muñoz, E. Herrera-Viedma, A. Santisteban-Espejo, and M. J. Cobo, "Software tools for conducting bibliometric analysis in science: An up-to-date review," *Profesional de la información*, vol. 29, no. 1, Jan. 2020, doi: 10.3145/epi.2020.ene.03.

[5]F. Munarin, M. C. Tanzi, and P. Petrini, "Advances in biomedical applications of pectin gels," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 51, no. 4, pp. 681–689, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2012.07.002.

[6]C. Schmitt, C. Sanchez, S. Desobry-Banon, and J. Hardy, "Structure and technofunctional properties of protein-polysaccharide complexes: a review," *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 38, no. 8, pp. 689–753, Nov. 1998, doi: 10.1080/10408699891274354.

[7]B. R. Thakur, R. K. Singh, and A. K. Handa, "Chemistry and uses of pectin--a review," *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 37, no. 1, pp. 47–73, Feb. 1997, doi: 10.1080/10408399709527767.

[8]M. Zuluaga, S. Robledo, O. Arbelaez-Echeverri, G. A. Osorio-Zuluaga, and N. Duque-Méndez, "Tree of Science - ToS: A Web-based Tool for Scientific Literature Recommendation. Search Less, Research More!," *Issues Sci. Technol. Librariansh.*, vol. 100, 2022, doi: 10.29173/istl2696.

[9]S. Robledo, M. Zuluaga, L. A. Valencia, O. Arbelaez-Echeverri, P. Duque, and J.-D. Alzate-Cardona, "Tree of Science with Scopus: A Shiny Application," *Issues Sci. Technol. Librariansh.*, vol. 100, 2022, doi: 10.29173/istl2698.

[10]"Eyespy: April 2009," *BMJ*. p. b978, 2009. doi: 10.1136/sbmj.b978.

[11]D. S. Valencia-Hernandez, S. Robledo, R. Pinilla, N. D. Duque-Méndez, and G. Olivar-Tost, "SAP Algorithm for Citation Analysis: An improvement to Tree of Science," *Ingeniería e Investigación*, vol. 40, no. 1, pp. 45–49, 2020, doi: 10.15446/ing.investig.v40n1.77718.

[12]D. A. Torres, A. M. B. Rodríguez, and P. A. E. Gutiérrez, "COVID-19 in Business, Management, and Economics: Research Perspectives and Bibliometric Analysis," *BAR, Braz. Adm. Rev.*, vol. 19, no. 3, Jul. 2022, doi: 10.1590/1807-7692bar2022220016.

[13]P. López-Rubio, N. Roig-Tierno, and A. Mas-Tur, "Which regions produce the most innovation policy research?," *Policy Studies*, pp. 1–23, Jun. 2021, doi: 10.1080/01442872.2021.1937595.

[14]A. E. Rubio, G. Y. F. Yepes, and L. A. V. Marín, "Gobernanza para el desarrollo y la sostenibilidad de los destinos turísticos: una revisión de la literatura con ToS," *Interfaces*,

vol. 5, no. 1, Sep. 2022, Accessed: Oct. 01, 2022. [Online]. Available: <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/interfaces/article/view/9459>

[15]T. Gersson, S. Robledo, and S. Rojas-Berrio, “Market orientation: importance, evolution, and emerging approaches using scientometric analysis,” *Criterio Libre*, vol. 19, no. 35, pp. 326–340, 2021.

[16]A. M. Barrera Rodríguez, E. J. Duque Oliva, and J. A. Vieira Salazar, “Actor engagement: origin, evolution and trends,” *J. bus. ind. mark.*, Sep. 2022, doi: 10.1108/jbim-11-2021-0512.

[17]S. Robledo, A. M. Grisales Aguirre, M. Hughes, and F. Eggers, “‘Hasta la vista, ¿baby’ – will machine learning terminate human literature reviews in entrepreneurship?,” *J. Small Bus. Manage.*, pp. 1–30, Aug. 2021, doi: 10.1080/00472778.2021.1955125.

[18]V. Ramos-Enríquez, P. Duque, and J. A. V. Salazar, “Responsabilidad Social Corporativa y Emprendimiento: evolución y tendencias de investigación,” *Des.Geren*, vol. 13, no. 1, pp. 1–34, Apr. 2021, doi: 10.17081/dege.13.1.4210.

[19]E. G. Muñoz, R. Fabregat, J. Bacca-Acosta, N. Duque-Méndez, and C. Avila-Garzon, “Augmented Reality, Virtual Reality, and Game Technologies in Ophthalmology Training,” *Information*, vol. 13, no. 5, p. 222, Apr. 2022, doi: 10.3390/info13050222.

[20]H. Semanate-Quiñonez, A. Upegui-Valencia, and M. Upegui-Valencia, “Blended learning, avances y tendencias en la educación superior: una aproximación a la literatura,” *Inf. tec.*, vol. 86, no. 1, pp. 46–68, 2022, doi: 10.23850/22565035.3705.

[21]D. D. Durán-Aranguren, S. Robledo, E. Gomez-Restrepo, J. W. Arboleda Valencia, and N. A. Tarazona, “Scientometric Overview of Coffee By-Products and Their Applications,” *Molecules*, vol. 26, no. 24, p. 7605, Dec. 2021, doi: 10.3390/molecules26247605.

[22]A. S. Gómez Tabares and M. C. Correa Duque, “La asociación entre acoso y ciberacoso escolar y el efecto predictor de la desconexión moral: una revisión bibliométrica basada en la teoría de grafos,” *Educ. XX1*, vol. 25, no. 1, pp. 273–308, Jan. 2022, doi: 10.5944/educxx1.29995.

[23]F. Eggers, H. Risselada, T. Niemand, and S. Robledo, “Referral campaigns for software startups: The impact of network characteristics on product adoption,” *J. Bus. Res.*, vol. 145, pp. 309–324, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.jbusres.2022.03.007.

[24]R. M. Hodge, G. H. Edward, and G. P. Simon, “Water absorption and states of water in semicrystalline poly(vinyl alcohol) films,” *Polymer*, vol. 37, no. 8, pp. 1371–1376, Apr. 1996, doi: 10.1016/0032-3861(96)81134-7.

[25]I. T. Norton and W. J. Frith, "Microstructure design in mixed biopolymer composites," *Food Hydrocoll.*, vol. 15, no. 4–6, pp. 543–553, Jul. 2001, doi: 10.1016/s0268-005x(01)00062-5.

[26]C. G. de Kruif and R. Tuinier, "Polysaccharide protein interactions," *Food Hydrocoll.*, vol. 15, no. 4–6, pp. 555–563, Jul. 2001, doi: 10.1016/s0268-005x(01)00076-5.

[27]M. Girard, S. L. Turgeon, and S. F. Gauthier, "Interbiopolymer complexing between β -lactoglobulin and low- and high-methylated pectin measured by potentiometric titration and ultrafiltration," *Food Hydrocoll.*, vol. 16, no. 6, pp. 585–591, Nov. 2002, doi: 10.1016/s0268-005x(02)00020-6.

[28]M.-F. Grenier-Loustalot, S. Larroque, D. Grande, P. Grenier, and D. Bedel, "Phenolic resins: 2. Influence of catalyst type on reaction mechanisms and kinetics," *Polymer*, vol. 37, no. 8, pp. 1363–1369, Apr. 1996, doi: 10.1016/0032-3861(96)81133-5.

[29]M. Girard, S. L. Turgeon, and S. F. Gauthier, "Thermodynamic parameters of beta-lactoglobulin-pectin complexes assessed by isothermal titration calorimetry," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 51, no. 15, pp. 4450–4455, Jul. 2003, doi: 10.1021/jf0259359.

[30]N. Neiryck, P. Van der Meeren, M. Lukaszewicz-Lausecker, J. Cocquyt, D. Verbeken, and K. Dewettinck, "Influence of pH and biopolymer ratio on whey protein–pectin interactions in aqueous solutions and in O/W emulsions," *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 298, no. 1, pp. 99–107, Apr. 2007, doi: 10.1016/j.colsurfa.2006.12.001.

[31]O. G. Jones, E. A. Decker, and D. J. McClements, "Formation of biopolymer particles by thermal treatment of β -lactoglobulin–pectin complexes," *Food Hydrocoll.*, vol. 23, no. 5, pp. 1312–1321, Jul. 2009, doi: 10.1016/j.foodhyd.2008.11.013.

[32]P. Moll, H. Salminen, A. Rausch, C. Schmitt, and J. Weiss, "Adjusting the stickiness of concentrated pea protein – apple pectin systems via the biopolymer mixing ratio," *Future Foods*, vol. 6, no. 100184, p. 100184, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.fufo.2022.100184.

[33]A. Archut, S. Drusch, and H. Kastner, "Complex coacervation of pea protein and pectin: Effect of degree and pattern of free carboxyl groups on biopolymer interaction," *Food Hydrocoll.*, vol. 133, no. 107884, p. 107884, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.foodhyd.2022.107884.

[34]L. Mihalcea et al., "Whey Proteins Isolate-Based Biopolymeric Combinations to Microencapsulate Supercritical Fluid Extracted Oleoresins from Sea Buckthorn Pomace," *Pharmaceuticals*, vol. 14, no. 12, Nov. 2021, doi: 10.3390/ph14121217.

[35]K. Protte, F. Balinger, J. Weiss, R. Löffler, and S. Nöbel, "Establishing the biopolymer ratio of whey protein–pectin complexes before and after thermal stabilisation," *Food Hydrocoll.*, vol. 89, pp. 554–562, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.foodhyd.2018.11.015.

[36]Y. Lan, B. Chen, and J. Rao, “Pea protein isolate–high methoxyl pectin soluble complexes for improving pea protein functionality: Effect of pH, biopolymer ratio and concentrations,” *Food Hydrocoll.*, vol. 80, pp. 245–253, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.foodhyd.2018.02.021.

[37]C. J. F. Souza, A. R. da Costa, C. F. Souza, F. F. S. Tosin, and E. E. Garcia-Rojas, “Complex coacervation between lysozyme and pectin: Effect of pH, salt, and biopolymer ratio,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 107, no. Pt A, pp. 1253–1260, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.09.104.

[38]B. Zeeb, L. Mi-Yeon, M. Gibis, and J. Weiss, “Growth phenomena in biopolymer complexes composed of heated WPI and pectin,” *Food Hydrocoll.*, vol. 74, pp. 53–61, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.foodhyd.2017.07.026.

[39] B. Zeeb et al., “Mixing behaviour of WPI-pectin-complexes in meat dispersions: impact of biopolymer ratios,” *Food Funct.*, vol. 8, no. 1, pp. 333–340, Jan. 2017, doi: 10.1039/c6fo01436d.

[40]B. Zeeb, C. Stenger, J. Hinrichs, and J. Weiss, “Formation of concentrated particles composed of oppositely charged biopolymers for food applications – impact of processing conditions,” *Food Structure*, vol. 10, pp. 10–20, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.foostr.2016.10.002.

[41]G. Callejas-Quijada, N. Chavarría-Hernández, M.-R. López-Cuellar, A. Zepeda-Bastida, and A.-I. Rodríguez-Hernández, “Films of biopolymers, pectin and gellan, enriched with natamycin and clove essential oils for the packaging of Corn tortilla: Protection against *Staphylococcus aureus* and *Candida parapsilosis*,” *Food Microbiol.*, vol. 110, p. 104156, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.fm.2022.104156.

[42]S. Regina, T. Poerio, R. Mazzei, C. Sabia, R. Iseppi, and L. Giorno, “Pectin as a non-toxic crosslinker for durable and water-resistant biopolymer-based membranes with improved mechanical and functional properties,” *Eur. Polym. J.*, vol. 172, p. 111193, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2022.111193.

[43]L. Marangoni Júnior, C. R. Fozzatti, E. Jamróz, R. P. Vieira, and R. M. V. Alves, “Biopolymer-Based Films from Sodium Alginate and Citrus Pectin Reinforced with SiO₂,” *Materials*, vol. 15, no. 11, May 2022, doi: 10.3390/ma15113881.

[44]M. Ramos-Andrés, S. Díaz-Cesteros, N. Majithia, and J. García-Serna, “Pilot-scale biorefinery for the production of purified biopolymers based on hydrothermal treatment in flow-through reactor cycles,” *Chem. Eng. J.*, vol. 437, p. 135123, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.cej.2022.135123.

[45]J. Chu et al., “Short-time acoustic and hydrodynamic cavitation improves dispersibility and functionality of pectin-rich biopolymers from citrus waste,” *J. Clean. Prod.*, vol. 330, p. 129789, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129789.

[46]P. Choudhary, A. Pathak, P. Kumar, S, Chetana, and N. Sharma, “Commercial production of bioplastic from organic waste-derived biopolymers viz-a-viz waste treatment: A minireview,” *Biomass Conversion and Biorefinery*, Aug. 2022, doi: 10.1007/s13399-022-03145-1.

[47]Geetanjali and R. Singh, “Chapter 3 - Production of biopolymer-based nanoparticles,” in *Bio-Based Nanomaterials*, A. K. Mishra and C. M. Hussain, Eds. Elsevier, 2022, pp. 53–65. doi: 10.1016/B978-0-323-85148-0.00003-8.

[48]D. N. Dao, P. H. Le, D. X. Do, T. M. Q. Dang, S. K. Nguyen, and V. Nguyen, “Pectin and cellulose extracted from coffee pulps and their potential in formulating biopolymer films,” *Biomass Convers. Biorefin.*, Jan. 2022, doi: 10.1007/s13399-022-02339-x.

[49]X. Z. Tang, P. Kumar, S. Alavi, and K. P. Sandeep, “Recent advances in biopolymers and biopolymer-based nanocomposites for food packaging materials,” *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 52, no. 5, pp. 426–442, 2012, doi: 10.1080/10408398.2010.500508.

[50]R. J. N. Tiozon, A. P. Bonto, and N. Sreenivasulu, “Enhancing the functional properties of rice starch through biopolymer blending for industrial applications: A review,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 192, pp. 100–117, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.09.194.

[51]B. Jaleh, M. Nasrollahzadeh, A. Nasri, M. Eslamipanah, A. Moradi, and Z. Nezafat, “Biopolymer-derived (nano)catalysts for hydrogen evolution via hydrolysis of hydrides and electrochemical and photocatalytic techniques: A review,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 182, pp. 1056–1090, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.04.087.

[52]P. Perumal, P. Christopher Selvin, and S. Selvasekarapandian, “Characterization of biopolymer pectin with lithium chloride and its applications to electrochemical devices,” *Ionics*, vol. 24, no. 10, pp. 3259–3270, Oct. 2018, doi: 10.1007/s11581-018-2507-5.